



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STAVEBNÍ
ÚSTAV STAVEBNÍHO ZKUŠEBNICTVÍ

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING
INSTITUTE OF BUILDING TESTING

MOŽNOSTI VYUŽITÍ ROZPTÝLENÉ VÝZTUŽE PRO KONSTRUKČNÍ BETONY

POSSIBILITIES OF DISPERSED REINFORCEMENT FOR STRUCTURAL CONCRETE

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Bc. RADOMÍR MICHNIAK

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

Ing. JAROMÍR LÁNÍK

BRNO 2013



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ FAKULTA STAVEBNÍ

Studijní program	N3607 Stavební inženýrství
Typ studijního programu	Navazující magisterský studijní program s prezenční formou studia
Studijní obor	3607T009 Konstrukce a dopravní stavby
Pracoviště	Ústav stavebního zkušebnictví

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Diplomant	Bc. RADOMÍR MICHNIAK
Název	Možnosti využití rozptýlené výztuže pro konstrukční betony
Vedoucí diplomové práce	Ing. Jaromír Láník
Datum zadání diplomové práce	31. 3. 2012
Datum odevzdání diplomové práce	11. 1. 2013

V Brně dne 31. 3. 2012

.....
prof. Ing. Leonard Hobst, CSc.
Vedoucí ústavu

.....
prof. Ing. Rostislav Drochytka, CSc.
Děkan Fakulty stavební VUT

Podklady a literatura

[1] KRÁTKÝ, Jiří; TRTÍK, Karel; VODIČKA, Jan. Drátkobetonové konstrukce. Praha 1: Informační centrum ČKAIT, 1999. 108 s. ISBN 80-86364-00-3

[2] TP FC 1-1. Zkoušení vláknobetonu – Vyhodnocení destruktivních zkoušek a stanovení charakteristického pracovního diagramu vláknobetonu pro navrhování vláknobetonových konstrukcí. Praha: Českomoravský beton, a. s., 2007. 34 s.

Zásady pro vypracování

Diplomová práce je zaměřena na možnosti využití rozptýlené polypropylenové výztuže za účelem zlepšení vybraných fyzikálně mechanických vlastností obyčejných konstrukčních betonů. Sledované parametry výsledného vláknocementového kompozitu budou zejména pevnostní, deformační a lomové. Cílem práce je provedení podrobného rozboru zadané problematiky včetně realizace a vyhodnocení vlastního měření. Na základě získaných výsledků bude proveden teoretický návrh a výpočet nosné konstrukce z obyčejného vláknobetonu.

Práce bude rozčleněna do dvou ucelených částí – teoretickou a experimentální. V teoretické části podrobně popište zkoumanou problematiku, zejména popište problematiku konstrukčních betonů a betonů obsahujících polypropylenovou rozptýlenou výztuž, úskalí při výrobě, zpracování a ukládání. Podrobně popište typy použitých vláken a jejich fyzikálně mechanické vlastnosti. V experimentální části vyrobte zkušební tělesa pro stanovení fyzikálně mechanických a lomových parametrů vláknocementových kompozitů. Získané výsledky srovnajte s referenčním betonem bez vláken.

Experimentálně získaná data uspořádejte do přehledných tabulek a na základě výsledků proveďte teoretický výpočet nosné konstrukce z vláknobetonu. Výsledky výpočtu porovnejte se stejnou konstrukcí obsahující konvenční vyztužení ocelovými pruty. V závěru práce proveďte celkové zhodnocení provedených měření, zejména vliv dávky vláken na výsledné fyzikálně mechanické vlastnosti cementového kompozitu.

.....
Ing. Jaromír Láník
Vedoucí diplomové práce

Bibliografická citace VŠKP

MICHNIAK, Radomír. *Možnosti využití rozptýlené výztuže pro konstrukční betony*. Brno, 2013. 95 s., 9 s. příl. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav stavebního zkušebnictví. Vedoucí práce Ing. Jaromír Láník.

Abstrakt

Diplomová práce je zaměřena především na polypropylenová vlákna, na jejich vlastnosti, dostupnost a úskalí spojená s použitím v praxi. V experimentální části práce jsou uvedeny výsledky zkoušení zkušebních těles s rozptýlenou výztuží v různém poměru vláken a jejich vzájemné porovnání.

Klíčová slova

Diplomová práce, beton, vláknobeton, polypropylenová vlákna, fyzikálně mechanické parametry, lomové parametry, akustická emise, statický výpočet, ATENA.

Abstract

The master's thesis is focused on polypropylene fibres, their properties, availability, pitfalls associated with the use in practice. In the experimental part are the results of testing specimens with dispersed reinforcement fibers in varying proportions and their comparison.

Key words

Master's thesis, concrete, fibreconcrete, polypropylene fibers, physico-mechanical parameters, fracture parameters, acoustic emission, static calculation, ATENA.

Prohlášení:

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci zpracoval samostatně a že jsem uvedl všechny použité informační zdroje.

V Brně dne 10. 1. 2013

.....
Bc. Radomír Michniak

Poděkování

Děkuji Ing. Jaromíru Láníkovi, Ing. Petru Žíttovi a Ing. Barbaře Kucharczykové, Ph.D. za rady a pomoc při vypracování diplomové práce.

Obsah

1.	Úvod.....	9
2.	Cíl práce	10
3.	Teoretická část	11
3.1	Beton	11
3.1.1	Kamenivo	12
3.1.2	Voda	13
3.1.3	Cement	14
3.1.4	Příspěvky.....	15
3.1.5	Příměsi	15
3.2	Vlákna	16
3.2.1	Typy vláken.....	17
3.2.2	Polypropylenová vlákna.....	19
3.3	Vláknobeton	22
3.3.1	Rozdělení vláknobetonu.....	23
3.3.2	Výhody vláknobetonu	24
3.3.3	Výroba vláknobetonu	24
3.3.4	Značení a pevnostní třídy vláknobetonu	25
3.3.5	Zkoušky vláknobetonu	28
3.4	Výpočtový program ATENA.....	31
4.	Experimentální část.....	33
4.5	Zkušební tělesa.....	33
4.5.1	Výroba čerstvého betonu.....	33
4.5.2	Výroba a ošetřování zkušebních těles	35
4.6	Fyzikálně mechanické vlastnosti zkušebních těles	35
4.6.1	Stejnorodost	35
4.6.2	Objemová hmotnost	36
4.6.3	Informativní pevnost v tlaku	37
4.6.4	Pevnost v tlaku	38
4.6.5	Pevnost v příčném tahu	40
4.6.6	Statický modul pružnosti v tlaku	42
4.6.7	Modul pružnosti a přetvárnosti v tahu ohybem.....	44

4.6.8	Dynamický modul pružnosti v tlaku a tahu, dynamický modul pružnosti ve smyku.	47
4.6.9	Lomové parametry	54
4.6.10	Akustická emise	63
4.7	Statický výpočet	67
4.7.1	Mezní stav únosnosti.....	68
4.7.2	Mezní stav použitelnosti	71
4.8	Numerická analýza programem ATENA.....	77
5.	Závěr	82
6.	Seznam použité literatury.....	87
7.	Seznam obrázků	92
8.	Seznam tabulek	94
9.	Seznam příloh.....	96

1. Úvod

Kompozitní materiály na bázi cementu s náhodně rozptýlenou výztuží můžeme označit jednotným termínem vláknobeton. Vlákná rozdělujeme podle materiálu na vlákna ocelová, skleněná, syntetická a přírodní. Vlastnosti výsledných kompozitů se stejnou matricí jsou ovlivněny především změnou materiálu vláken, geometrií, množstvím a rozmístěním vláken.

Počátky kompozitních materiálů můžeme hledat už v Mezopotámii, nicméně využití hydraulický pojiv, a tedy výroba prvních betonů se datuje do období starého Říma, kdy se začaly používat pucolány. S prvním použitím portlandského cementu v roce 1756 britským inženýrem Johnem Smeatonem, se začal význam betonu, jako stavebního materiálu, výrazně zvyšovat. [26]

Myšlenka použití vláken pro vyztužení materiálu není nijak nová, dokonce už ve starověku se do malt přidávaly výztuhy v podobě slámy a do hliněných cihel se přidávaly koňské žíně, peří nebo rákos. Od počátku 20. století se stala nejpoužívanější vlákna azbestová. Později se zjistilo, že azbestová vlákna jsou karcinogenní a nastala potřeba objevit jiná vhodná vlákna do betonů. Od té doby se proces vývinu nových vláken nezastavil a trvá dodnes. [10]

Vláknobeton je, především v České republice, poměrně málo používaný materiál. Je to způsobeno hned několika důvody. Jeden z nich je vysoká cena vláken, která však nemusí navýšit výslednou cenu, díky rychlejší technologickým řešením, které vedou k finančním úsporám, a díky sníženým nákladům na údržbu během životního cyklu stavby. Je tedy vždy zapotřebí pečlivě uvážit, zda se použití vláknobetonu v konstrukcích vyplatí z ekonomického hlediska. Dalším důvodem je malá informovanost investorů a obava z poměrně nového materiálu. Nicméně i přesto řada českých firem vyvíjí výrobky z vláknobetonu a zavádí používání vláknobetonu na stavbách.

2. Cíl práce

Diplomová práce navazuje na bakalářskou práci s názvem „Analýza možností využití vláken jako rozptýlené výztuže v cementových kompozitech“ a je zaměřená především na vlákna polypropylenová.

Vedle teoretické části, která je zaměřena na popis jednotlivých druhů vláken, jejich vlastností a dostupnost na českém trhu, jsou v experimentální části diplomové práce uvedeny výsledky laboratorního měření na zkušebních tělesech vyztužených různými kombinacemi vláken a na zkušebních tělesech bez vláken. Měření probíhalo na vzorcích se stejnou betonovou matricí, avšak s jiným poměrem a množstvím polypropylenových vláken. Výsledkem je porovnání vlastností vzorků s odlišným množstvím polypropylenových vláken. Poslední částí diplomové práce je statický výpočet fiktivního železobetonového průvlaku z betonu bez vláken, jehož návrh slouží pro simulaci chování průvlaků z vláknobetonu ve výpočtovém programu ATENA a následné porovnání těchto průvlaků mezi sebou.

3. Teoretická část

3.1 Beton

Betonem nazýváme kompozitní materiál složený z více složek o různých vlastnostech. Základní složky betonů jsou plnivo (kamenivo), pojivo (cement) a voda, popřípadě se používají příměsi a přísady zlepšující fyzikálně mechanické vlastnosti cementových kompozitů.

Pro označení betonu se používá značka ve tvaru $C f_{ck,cyl} / f_{ck,cub}$, kde C je označení betonu z anglického slova concrete, $f_{ck,cyl}$ je charakteristická válcová pevnost betonu v tlaku a $f_{ck,cub}$ je charakteristická krychelná pevnost betonu v tlaku. Betony rozdělujeme dle normy ČSN EN 1992 – 1 – 1 do 14 tříd:

Charakteristika betonu		Třídy betonu														Vztah
		C 12/15	C 16/20	C 20/25	C 25/30	C 30/37	C 35/45	C 40/50	C 45/55	C 50/60	C 55/67	C 60/75	C 70/85	C 80/95	C 90/105	
Pevnost v tlaku	f_{ck} [MPa]	12	16	20	25	30	35	40	45	50	55	60	70	80	90	$f_{ck} = f_{ck,cyl}$ [viz EN 206-1]
	$f_{ck,cube}$ [MPa]	15	20	25	30	37	45	50	55	60	67	75	85	95	105	
	f_{cm} [MPa]	20	24	28	33	38	43	48	53	58	63	68	78	88	98	$f_{cm} = f_{ck} + 8$ [MPa]
Pevnost v tahu	f_{ctm} [MPa]	1,6	1,9	2,2	2,6	2,9	3,2	3,5	3,8	4,1	4,2	4,4	4,6	4,8	5,0	$f_{ctm} = 0,3 f_{ck}^{(2/3)} \leq C50/60$ $f_{ctm} = 2,12 \ln[1+(f_{cm}/10)] > C 50/60$
	$f_{ctk,0,05}$ [MPa]	1,1	1,3	1,5	1,8	2,0	2,2	2,5	2,7	2,9	3,0	3,1	3,2	3,4	3,5	$f_{ctk,0,05} = 0,7 f_{ctm}$ (0,05 kvantil)
	$f_{ctk,0,95}$ [MPa]	2,0	2,5	2,9	3,3	3,8	4,2	4,6	4,9	5,3	5,5	5,7	6,0	6,3	6,6	$f_{ctk,0,95} = 1,3 f_{ctm}$ (0,95 kvantil)
E_{cm} [GPa]		27	29	30	31	32	34	35	36	37	38	39	41	42	44	$E_{cm} = 22 (f_{cm}/10)^{0,3}$ (f_{cm} v MPa)
Přetvoření betonu	ϵ_{c1} [‰]	1,80	1,90	2,00	2,10	2,20	2,25	2,30	2,40	2,45	2,50	2,60	2,70	2,80	2,80	ϵ_{c1} [‰] = $0,7 f_{cm}^{0,31} < 2,80$ (obr.a)
	ϵ_{cu1} [‰]	3,50									3,20	3,00	2,80	2,80	2,80	pro $f_{ck} \geq 50$ MPa (obr. a) ϵ_{cu1} [‰] = $2,80+27[(98-f_{cm})/100]^4$
	ϵ_{c2} [‰]	2,00									2,20	2,30	2,40	2,50	2,60	pro $f_{ck} \geq 50$ MPa (obr. b) ϵ_{c2} [‰] = $2,00+0,085(f_{ck}-50)^{0,53}$
	ϵ_{cu2} [‰]	3,50									3,10	2,90	2,70	2,60	2,60	pro $f_{ck} \geq 50$ MPa (obr. b) ϵ_{cu2} [‰] = $2,60+35[(90-f_{ck})/100]^4$
	n	2,00									1,75	1,60	1,45	1,40	1,40	pro $f_{ck} \geq 50$ MPa $n = 1,40+23,4[(90-f_{ck})/100]^4$
	ϵ_{c3} [‰]	1,75									1,80	1,90	2,00	2,20	2,30	pro $f_{ck} \geq 50$ MPa (obr. c) ϵ_{c3} [‰] = $1,75+0,55[(f_{ck}-50)/40]$
	ϵ_{cu3} [‰]	3,50									3,10	2,90	2,70	2,60	2,60	pro $f_{ck} \geq 50$ MPa (obr. c) ϵ_{cu3} [‰] = $2,60+35[(90-f_{ck})/100]^4$

Tab. 3-1 Pevnostní třídy betonu a jejich charakteristiky

Obecně pevnost posuzujeme jako schopnost materiálu vzdorovat vzniklým napětím. Pevností betonu rozumíme mezní napětí σ v betonu, při kterém dojde ke zlomu, tj. globálnímu porušení soudržnosti. [9]

Podle toho, jakým způsobem je zkušební těleso zatěžováno, rozlišujeme tyto typy pevností: pevnost v tlaku, pevnost v tahu, pevnost v ohybu, smykovou pevnost a pevnost betonu v kroucení.

Při navrhování betonových konstrukcí je rozhodující pevnost betonu v tlaku. Pevnost betonu v tahu se pohybuje mezi 10 až 15% z pevnosti betonu v tlaku. Z toho je zřejmé, že beton špatně odolává tahovým účinkům zatížení a proto je nutné vyztužovat jej betonářskou výztuží, předpínací výztuží nebo rozptýlenými vlákny, které tahové účinky zachytí.

3.1.1 Kamenivo [3], [29]



Obr. 3-1 Ukázka těžného a drceného kameniva [40], [41]

Kamenivo zaujímá 75 až 80 % objemu betonu a vytváří pevnou kostru betonu s minimální mezerovitostí. Proto je nejvhodnější kamenivo s plynulou čarou zrnitosti, tedy se zastoupením všech frakcí. Kamenivo je přírodní nebo umělá anorganická látka, dělí se podle původu, velikosti zrna, vzniku a podle pórovitosti.

Přírodní kamenivo

Drcené kamenivo vzniká drcením lomového kamene, těžné kamenivo vzniká přirozeným rozpadem hornin a zrna jsou přirozeným způsobem zaoblena. Předrcené kamenivo obsahuje 40 – 80 % drcených zrn, zbylý obsah tvoří zrna přirozeně zvětřalé horniny. Podle velikosti zrna a jejich skladby rozlišujeme:

- hrubé kamenivo s velikostí zrn 4 – 125 mm (štěrk, drť),

- drobné kamenivo s velikostí zrn do 4 mm (písek),
- jemné kamenivo do velikosti zrn 0,25 nebo 0,125 mm (filer),
- štěrkopísek, směs přírodního a těžného hrubého a drobného kameniva, omezená největším zrnem,
- štěrkodeř, směs drceného přírodního kameniva hrubého i drobného, omezená největším zrnem.

Umělé kamenivo

Vyrábí se úpravou a zpracováním nerostných surovin – tepelnou expanzí jílu nebo sbalováním popílku. Umělé kamenivo se vyznačuje vysokou pórovitostí a nízkou objemovou hmotností. V České republice se vyrábí jediné umělé kamenivo – Liapor, dříve označován jako Keramzit.

3.1.2 Voda [3]

V betonářské technologii rozlišujeme podle funkce dva druhy vody:

- Hydratační - podmiňuje hydrataci cementu, čímž vytváří spolu s cementem tuhou strukturu cementového kamene. Minimální množství vody na hydrataci cementu je 23 – 25 % hmotnosti cementu.
- Reologická – umožňuje vytvoření tvárného čerstvého betonu ve spojení s jeho složkami. Kapilárními silami je zajištěna koheze, viskozitou je zajištěna plastičnost čerstvého betonu.

Dále vodu dělíme na záměsovou a ošetřovací. Záměsová i ošetřovací voda musí vyhovovat kvalitativním požadavkům. Vhodnost vody závisí na jejím zdroji:

- Pitná voda je použitelná vždy.
- Recyklovaná voda, používaná v uzavřeném technologickém cyklu při výrobě transportbetonu, běžně vyhovuje, musí se však denně měřit její objemová hmotnost, která nemá přesáhnout hodnotu 1010 kg.m^{-3} . Objemová hmotnost

vyšší ukazuje na přítomnost cementového kalu. Chemické složení vody se hodnotí týdně po dobu prvního měsíce používání, později jen jednou měsíčně.

- Přírodní podzemní a povrchová voda musí být vyzkoušena před jejím prvním použitím.
- Průmyslovou odpadní vodu lze použít jen za určitých podmínek. Analýza se provádí před jejím prvním použitím a potom pravidelně během používání tak často, jak to vyžadují její proměnné vlastnosti.
- Mořská voda je vhodná jen pro prostý beton. Pro použití v železovém a předpjatém betonu je zcela nevhodná vzhledem k celkovému množství chloridů v betonu, které nesmí překročit požadovanou mez.
- Splašková voda je pro betony nepoužitelná.

3.1.3 Cement

Cement je polydisperzní partikulární anorganická látka s hydraulickými vlastnostmi. Po smíchání s vodou postupně tuhne a tvrdne. Po zatvrdnutí zachovává svojí pevnost a stálost ve vodě. Hydraulické tvrdnutí je způsobena hydratací vápenatých silikátů a aluminátů. [3]

V souboru cementů je podle normy ČSN EN 197 – 1 specifikováno 27 výrobků pro obecné použití. Jsou rozděleny do 5 základních skupin podle složení.

- CEM I Portlandský cement,
- CEM II Portlandský cement směsný,
- CEM III Vysokopeční cement,
- CEM IV Pucolánový cement,
- CEM V Směsný cement.

Pevnostní třídy těchto cementů uvedené v normě ČSN EN 197 – 1 jsou 32,5 MPa, 42,5 MPa a 52,5 MPa. [8]

3.1.4 Přísady [3]

Přísady jsou chemické sloučeniny, které se přidávají během mísení betonu v množství do 5 % hmotnosti cementu. Jejich hlavní funkcí je úprava vlastností čerstvého nebo ztvrdlého betonu. Základní druhy přísad jsou:

- plastifikační (redukující vodu)
- superplastifikační (velmi redukující vodu)
- stabilizační (zadržují vodu)
- provzdušňující
- urychlující tuhnutí cementu
- urychlující tvrdnutí cementu
- zpomalující tuhnutí
- hydrofobizační (odpužující vodu)

Přísady především působí na cementový tmel a jejich působení je tedy závislé na použitém cementu.

3.1.5 Příměsi [3], [27]

Příměsi jsou většinou práškovité látky, které se přidávají do betonu za účelem vylepšení vlastností nebo k docílení zvláštních vlastností. U čerstvého betonu se jedná zejména o konzistenci a zpracovatelnost, u ztvrdlého betonu o pevnost, hutnost, trvanlivost nebo odolnost proti chemicky agresivnímu prostředí. Jedná se především o mletou strusku, vápenec, kamenné moučky, křemičitý úlet (tzv. mikrosilika) a popílek. Příměsi se přidávají v takovém množství, aby negativně neovlivnily vlastnosti betonu, především jeho trvanlivost nebo korozi oceli.

3.2 Vlákna



Obr. 3-2 Polypropylénová a ocelová vlákna [37], [38]

Vlákna omezují vznik trhlin v počátečním stavu betonu, ale také zvyšují pevnost betonu v tahu. Vzhledem k funkci, kterou vlákna v betonu plní, rozdělujeme vlákna do dvou základních skupin na vlákna protismršťovací a na vlákna konstrukční.

Vlákna pro výrobu vláknobetonu můžeme rozdělit podle materiálu, ze kterého jsou vyrobeny do následujících skupin [10]:

- vlákna ocelová
- vlákna polymerová (syntetická)
- vlákna skleněná
- vlákna přírodní
- vlákna azbestová

Pro přehlednost jsou hlavní fyzikální a mechanické vlastnosti jednotlivých druhů vláken seřazeny do následující tabulky:

Tab. 3-2 Fyzikální a mechanické vlastnosti vláken [1]

<i>vlákna</i>	<i>Průměr (mm)</i>	<i>Měrná hmotnost (kg/m³)</i>	<i>Modul pružnosti (GPa)</i>	<i>Pevnost v tahu (MPa)</i>	<i>Přetvoření (%)</i>
Ocelová	0,15 - 1,0	7840	200	345 - 2100	0,5 – 3,5
Polymerová (PP)	0,015 - 1,0	900	5 - 77	500 - 750	8,0
Polymer.(uhlíková)	0,007 – 0,018	1600 - 1950	30 - 390	600 - 2700	0,5 – 2,4
Polymer. (PVA)	0,01	1300	20 - 50	1200 - 1500	-
Skleněná (E)	0,009 – 0,015	2540	72,5	3500	4,8
Skleněná (AR)	0,009 – 0,015	2780	70	2500	3,6
Přírodní (celulóza)	0,02 – 4,5	500 - 600	10	125 - 500	-
Azbestová	0,0001	2600	196	700	-

3.2.1 Typy vláken

A. Ocelová vlákna [1]

Vláknobeton s ocelovými vlákny je nejběžněji používaný vláknobeton, s jehož výzkumem se začalo už v 50. letech 20. století a těší se stále největší pozornosti. Používá se převážně u plochých prvků – chodníků a podlah, ale dobře se uplatňuje také při rekonstrukcích přehrad a mostů. Funkcí ocelových vláken je primárně eliminace a kontrola vzniku trhlin v konstrukcích.

Ocelová vlákna mají mnohem větší vliv na pevnost v ohybu než na pevnost v tlaku či prostém tahu. U konstrukcí s ocelovými vlákny přesahuje nárůst pevnosti v ohybu 100 %. Zvýšení pevnosti v ohybu může ovlivnit nejen objem použitých vláken, ale také poměr stran vláken - se zvyšujícím se poměrem se zvyšuje pevnost.

Ocelová vlákna jsou poměrně drahá – přidáním 1 % vláken se může cena výsledného vláknobetonu až zdvojnásobit.

B. Polymerová (syntetická) vlákna [1], [10]

Polymerová vlákna jsou oblíbená především v posledních letech v souvislosti s použitím v materiálech na bázi cementu. Jedná se o vlákna vyrobená z polymerních

materiálů, jakými jsou polypropylen, polyethylen, polyester, nylon, polyvinylalkohol (PVA), polyakryl, arami nebo jejich směsi.

Vlastnosti polymerových vláken se liší především modulem pružnosti, proto se polymerová vlákna rozdělují na vlákna nízkomodulová a vysokomodulová.

Nízkomodulová vlákna [2], [10]

Jedná se o vlákna nylonová, polyetylenová a především vlákna polypropylenová. Vzhledem k praktické části diplomové práce jsou v popředí zájmu vlákna polypropylenová a proto jim je věnována kapitola 3.2.3 Polypropylenová vlákna.

Vysokomodulová vlákna [1]

Vysokomodulová polymerová vlákna se rozdělují podle materiálu, ze kterého jsou vyrobena na vlákna uhlíková, aramidová (kevlarová), akrylová a polyvinylalkoholová (PVA).

C. Skleněná vlákna [1]

Skleněná vlákna byla vyvinuta k vyztužování velmi tenkých deskových konstrukcí, označovaných jako sklolaminátový cement (v USA se používá termín sklolaminátový beton). Skleněná vlákna jsou k dostání ve formě dlouhých kontinuálních vláken, krátkých vláken nebo ve formě rohoží.

Pro použití skleněných vláken v cementovém kompozitu se musela vyřešit nedostatečná odolnost E-skleněných vláken v zásaditém prostředí. Jako řešení toho problému byl vyvinut jiný typ skleněných vláken odolný v zásaditém prostředí - tzv. AR-skleněná vlákna. Jinou možností, jak tomuto problému předejít, je upravit matici tak, aby bylo možné použít *E* nebo *AR* skleněná vlákna.

Vláknobeton se skleněnými vlákny se používá především pro nekonstrukční nebo částečně konstrukční prvky konstrukce. Skleněná vlákna se uplatňují především u velmi tenkých konstrukcí, okolo 10 mm, a u konstrukcí složitějšího tvaru.

D. Přírodní vlákna [1]

Přírodní vlákna jsou vlákna organického původu a získávají se z rostlin. Podle původu se přírodní vlákna rozdělují na stvolová, listová, povrchová a dřevěná. Pro své vlastnosti, pevnost v tahu a modul pružnosti, se začala přírodní vlákna používat ve stavebnictví především u nízkonákladových prvků při stavbě domů.

Nejběžněji používaná přírodní vlákna jsou sisalová, jutová, kokosová a vlákna celulózová. Tato vlákna jsou náchylná k degradaci vlivem vlhkosti a bakteriemi, proto je nutné vlákna před použitím vhodně naimpregnovat.

E. Azbestová vlákna [1], [12]

První vlákna, kterými se cementové kompozity vyztužovaly, byla vlákna azbestová. Oblíbenými se stala především díky výborné schopnosti rovnoměrně rozptýlit i velké množství vláken (přesahující 10%).

Kompozity obsahující azbestová vlákna se vyznačují vysokým modulem pružnosti, vysokou pevností a odolností vůči vysokým teplotám. Díky těmto vlastnostem se azbestová vlákna v 70. letech 20. století používala s velkou oblibou. Po zjištění zdravotní závadnosti se od jejich používání postupně upouštělo. V České republice byl azbest přidán na seznam karcinogenních látek v roce 1984 a v roce 1997 bylo jeho používání zakázáno úplně.

3.2.2 Polypropylenová vlákna [2], [10]

Polypropylenová vlákna řadíme do skupiny syntetických vláken. Vyrábějí se v různých tvarech a s různými vlastnostmi. Polypropylenová vlákna se vyznačují nízkou elasticitou oproti jiným syntetickým vláknům. Chemické složení polypropylenu je $(C_3H_6)_n$.

Největší předností těchto syntetických vláken je odolnost vůči kyselému i zásaditému prostředí. Dalšími pozitivy těchto vláken je jejich nízká cena, nízká hmotnost a vysoký bod tání ($165^{\circ}C$). Naopak mezi nevýhody řadíme citlivost na sluneční záření, zhoršené

spolupůsobení s matricí, nižší požární odolnost (tato vlastnost může být i výhodou, například při použití na ostění tunelů) a nízký modul pružnosti.

Přidáním polypropylenových vláken do betonu eliminujeme vznik trhlin a rozvoj plastických smršťovacích trhlin v počátečním stavu tuhnutí a tvrdnutí betonu, omezíme objemové změny a s tím spojený vznik trhlin při vysychání betonu a v neposlední řadě zvýšíme reziduální duktilitu kompozitu vyztuženého polypropylenovými vlákny.

Podle způsobu výroby a podle tvaru jsou polypropylenová vlákna klasifikována následovně:

- Třída Ia – mikroválka s průměrem do 0,3 mm, tzv. monofilamentní vlákna vyráběná rozvlákněním taveniny.
- Třída Ib – mikroválka s průměrem do 0,3 mm, tzv. fibrilovaná vlákna vyráběná rozvlákněním (fibrilací) upravené plastové fólie.
- Třída II – makroválka s průměrem nad 3 mm vyráběná sdružováním jednotlivých vláken do svazků.

Druhy polypropylenových vláken dostupných na trhu

Vzhledem k tomu, že se jedná o vlákna, která se dostávají do popředí zájmu, existuje na našem trhu poměrně široký sortiment těchto vláken, např. Forta Ferro, Forta Econo – Net, Forta Econo – Mono, BeneSteel55, Fibrrex, Stavon, Fibrin. Jedná se především o vlákna vyráběná přímo v České republice nebo o vlákna dovážená z USA.

Forta Ferro [30]

Vlákna Forta Ferro jsou vysoce účinná vlákna vyráběná kombinací polypropylenového monofilamentního nefibrilovaného vlákna a síťových fibrilovaných vláken. Používají se k omezení smršťování betonu v plastickém i vytvrzeném stavu, zlepšení rázové odolnosti, zvýšení únavové odolnosti a houževnatosti betonu. Tato vlákna vykazují vysokou životnost, především při velkém zatížení. Vlákna jsou dostupná v délkách 19, 36 nebo 54 mm a jejich cena je 240 Kč za kilogram vláken.

Forta Econo – Net [30]

Vlákna jsou vyráběná jako fibrilovaná (síťová). Využití těchto vláken zvyšuje rázovou odolnost, únavovou odolnost a houževnatost betonu. Tato vlákna zaručují dlouhou životnost a vzhledem k fibrilovanému tvaru i dobré mechanické vlastnosti. Jsou dostupná v délkách 19 nebo 38 mm a jejich cena je 234 Kč za kilogram vláken.

Forta Econo – Mono [30]

Forta Econo-Mono je snadno zpracovatelné polypropylenové monofilamentní vlákno. Vlákno se vyznačuje dlouhou životností a používá se k omezení primárních trhlin při smršťování betonu. Vlákna jsou dostupná pouze v délce 54 mm.

BeneSteel55 [31]

Jsou vyrobena ze speciální směsi polypropylenu a polyetylenu. Tato vlákna jsou, díky svým vlastnostem, označována jako polymerní ocel. Norma ČSN EN 14889-2 zařazuje tato vlákna mezi polymerová vlákna třídy II – makrovlákna se statickým účinkem v betonu. Vlákna BeneSteel 55 mohou nahradit svařované sítě a ocelová vlákna v betonových podlahách. Tato vlákna se uplatňují při výrobě prefabrikátů složitých tvarů a díky sublimaci při vysokých teplotách se používají do žáruvzdorných betonových konstrukcí. Vlákna jsou dlouhá 55 mm o průměru 0,48 mm, jejich cena je 165 Kč za kilogram vláken.

Fibrrex 5, Fibrrex 12 [32]

Vlákna omezují trhliny při smršťování betonu v plastickém i vytvrzeném stavu a díky povrchové lubrikaci je zajištěno snadné rovnoměrné rozptýlení. Vlákna pozitivně ovlivňují mrazuvzdornost a vodotěsnost a snižují obrusnost betonu. Vlákna se používají u betonových podlah, při výrobě prefabrikátů a pro stříkaný beton. K dostání jsou ve dvou délkách 5 a 12 mm, vždy s průměrem 0,025 mm. Cena vláken Fibrrex 5 je 240 Kč za kilogram vláken a 218 Kč za kilogram vláken Fibrrex 12.

Stavon [33]

Vlákna Stavon zabraňují vzniku trhlin především při smršťování betonu, zvyšují elasticitu a pevnost v tahu a snižují množství dilatačních spár betonu. Jsou chemicky stále, odolné vůči poškození při míchání betonu a jsou výborně spolupůsobí s cementovými kompozity. Vlákna se uplatňují při výstavbě betonových podlah, chodníků, septiků, letištních ploch a fasád. Dodávají se v délkách 4, 8 a 12 mm s průměrem 0,018 – 0,032 mm. Cena vláken Stavon je 148 Kč za kilogram vláken.

Fibrin [34]

Vlákna Fibrin jsou rozvlákněná syntetická vlákna, která mají vynikající přilnavost k cementové pastě. Při míchání se rychle a rovnoměrně rozptýlí. Vlákna zabraňují vzniku smršťovacích trhlin, snižují vytrhávání betonu při odbedňování, zvyšují odolnost vůči abrazi, nárazům a v chemickém prostředí. Vlákna se používají u monolitických i prefabrikovaných konstrukcí, především u podlah, průmyslových podlah, nádrží a sil. K dostání jsou v délce 6, 12, 13 a 19,5 mm, o průměru 0,018, 0,032 a 0,4 mm.

3.3 Vláknobeton



Obr. 3-3 Čerstvý beton s ocelovými vlákny [36]

Vláknobeton je konstrukční stavební kompozitní materiál, jehož základní struktura vychází z prostého betonu doplněného o vlákna, která ztužují strukturu kompozitu. Vlákna musí tvořit v objemové jednotce vláknobetonu takový podíl, aby vznikl

homogenní vláknobeton se zlepšenou alespoň jednou fyzikálně mechanickou vlastností původního prostého betonu. [11]

3.3.1 Rozdělení vláknobetonu

Vláknobeton může rozdělit podle různých kritérií do několika skupin. Základní dělení se provádí podle funkce vláknobetonu v konstrukci, podle druhu použitých vláken, podle použité výztuže a podle způsobu výroby.

Dělení podle funkce:

- nosný vláknobeton
- nenosný vláknobeton

Dělení podle druhu vláken:

- vláknobeton s ocelovými vlákny
- vláknobeton se syntetickými vlákny
- vláknobeton se skleněnými vlákny
- vláknobeton s přírodními vlákny

Dělení podle použité výztuže:

- prostý vláknobeton
- vláknobeton vyztužený betonářskou výztuží
- vláknobeton vyztužený předpínací výztuží

Dělení podle způsobu výroby:

- vláknobeton vyráběný přímo na staveništi

- vláknobetonový prvky vyráběné ve výrobně konstrukčních vláknobetonových prvků
- vláknobeton dodáván přímo z centrální výroby vláknobetonu

3.3.2 Výhody vláknobetonu [28]

Vlákna se začala používat především k zabránění vzniku trhlin v jednotlivých materiálech. Rozptýlená vlákna výztuže zvyšovala integritu celého systému, čímž se redukovaly projevy objemových změn kolísáním vlhkosti. Postupně se však zjistilo, že vlákna se mohou vyztužovat i jinak křehké materiály a nahradit tak část konvenční výztuže. Při vycházení z návrhu tradiční výztuže se usoudilo, že přidáním určitého množství rozptýlené výztuže lze nahradit část tradiční výztuže, čímž se výrazně zkrátí čas potřebný k výrobě konstrukce spojený s jinak časově náročným svařováním a rozmisťováním konvenční betonářské výztuže.

Další nespornou výhodou vláknobetonu je, že rozptýlená výztuž zvyšuje houževnatost konstrukce a schopnost absorpce energie vyvolané nárazy a vibracemi. Rovněž jsou vláknobetony výhodné v konstrukcích, kde je dovolen vznik trhlin.

V dalším stádiu pomáhají distribuovat a přenášet vnitřní napětí způsobené tuhnutím a tvrdnutím kompozitu tak, aby zůstal celistvý a dosáhl požadované životnosti.

3.3.3 Výroba vláknobetonu

Účinnost vláknobetonu je založena na rovnoměrném přenosu zatížení ve všech směrech. Aby byla všesměrná účinnost zajištěna musí být vlákna rovnoměrně rozmístěna ve všech směrech a v celém objemu konstrukce. [28]

Některé typy vláken lze pouze nadávkovat jako jednu ze složek betonu bez jakéhokoli nebo s minimálním vlivem na technologii výroby betonu. Naopak některé typy vláken ovlivní technologii betonu zásadně včetně složení vláknobetonu. Takovými vlákny, které ovlivní technologii i složení vláknobetonu jsou vlákna ocelová a polypropylenová. [10]

Správně zvolený typ vláken a správná dávka vláken je jen dílčí krok ke kvalitní vláknobetonové konstrukci. Určitý podíl na nedostatečné homogenitě může mít, i u dobře navrženého betonu, vlastní výroba čerstvého vláknobetonu. Vlákná, která určují charakteristiku výsledného vláknobetonu předurčují, musí být při výrobě přidávána v pořadí, které určuje typ použitých vláken. Některá syntetická vlákna se přidávají do suchých směsí a naopak všechny typy ocelových vláken se musí přidávat jako poslední složka vláknobetonu. [10], [28]

Ve většině případů se vláknobeton vyrábí v autodomíchávačích (především s ocelovými vlákny), což není optimální řešení. I když se splní zásadní podmínka ocelových vláken, tedy dávkování vláken jako poslední složku, dosáhneme homogenitu směsi jen za cenu prodloužení času mísení, protože autodomíchávač nemá výkonnost stejnou jako míchačka s nuceným oběhem. Nejlepším řešením, jak dosáhnout optimální homogenity směsi, je používání strojních zařízení používaných na betonárnách. [10]



Obr. 3-4 Shluky vláken při nesprávném mísení s betonovou směsí, tzv. ježci [10]

3.3.4 Značení a pevnostní třídy vláknobetonu [10], [11]

Při značení vláknobetonu se vychází z pevnostních tříd, které rozlišují pevnost vláknobetonu v tlaku, pevnost v tahu na mezi vzniku makrotrhlin a pevnost v tahu po vzniku makrotrhlin. Cementové kompozity s rozptýlenou výztuží se většinou označují ve tvaru $FC\ f_{fk,cyl}/f_{fk,cube} - f_{fc,tk}/f_{fc,tk,eq}$, kde FC je označení pro vláknobeton z anglického fibre concrete, $f_{fk,cyl}$ je charakteristická válcová pevnost, $f_{fk,cube}$ je charakteristická

krychelná pevnost vláknobetonu, $f_{fc,tk}$ je charakteristická pevnost vláknobetonu v tahu při vzniku trhlin a $f_{fc,tk,eq}$ je ekvivalentní pevnost vláknobetonu v tahu po vzniku trhlin. V literatuře se můžeme setkat s označením, které vláknobeton blíže specifikuje:

- vláknobeton prostý – FC,
- vláknobeton s ocelovými vlákny (drátkobeton) – SFC,
- vláknobeton se syntetickými vlákny – SYFC,
- vláknobeton se skleněnými vlákny – CLFC,
- vyztužený vláknobeton – RFC,
- vláknobeton vyztužený betonářskou výztuží – BRFC,
- vláknobeton vyztužený předpínací výztuží – PRFC.

V následujících tabulkách jsou uvedeny třídy vláknobetonu.

Tab. 3-3 Pevnostní třídy vláknobetonu v tlaku stanovené zkouškou válcové pevnosti [11]

<i>Pevnostní třída v tlaku</i>	<i>Charakteristická válcová pevnost $f_{fck,cyl}$ [MPa]</i>	<i>Charakteristická krychelná pevnost $f_{fck,cube}$ [MPa]</i>
FC 8/9	8	9
FC 12/13	12	13
FC 16/18	16	18
FC 20/22	20	22
FC25/28	25	28
FC 30/33	30	33
FC 35/38	35	38
FC 40/45	40	45
FC 50/55	50	50
FC 55/60	55	60
FC 60/67	60	67
FC 70/77	70	77
FC 80/88	80	88
FC 90/100	90	100

Tab. 3-4 Pevnostní třídy vláknobetonu v tlaku stanovené zkouškou krychelné pevnosti [11]

<i>Pevnostní třída v tlaku</i>	<i>Charakteristická válcová pevnost $f_{fck,cyl}$ [MPa]</i>	<i>Charakteristická krychelná pevnost $f_{fck,cube}$ [MPa]</i>
FC 9/10	9	10
FC 13/15	13	15
FC 18/20	18	20
FC 22/25	22	25
FC 27/30	27	30
FC 33/37	33	37
FC 40/45	40	45
FC 50/55	50	50
FC 55/60	55	60
FC 60/67	60	67
FC 67/75	67	75
FC 75/85	75	85
FC 85/95	85	95
FC 95/105	95	105

Tab. 3-5 Pevnostní třídy vláknobetonu v tahu na mezi vzniku makrotrhlin [11]

<i>Pevnostní třída v dostředném tahu $f_{fc,tk}$ [MPa]</i>	<i>Charakteristická pevnost v tahu za ohybu $f_{fc,tk,fl}$ [MPa]</i>	<i>Charakteristická pevnost v příčném tahu $f_{fc,tk,sp}$ [MPa]</i>
0,9	1,3	1,1
1,1	1,6	1,3
1,3	1,9	1,5
1,5	2,2	1,8
1,8	2,6	2,1
2,0	2,9	2,4
2,2	3,2	2,6
2,5	3,6	2,9
2,7	3,9	3,2
2,9	4,2	3,4
3,0	4,4	3,5
3,1	4,5	3,6
3,2	4,6	3,8
3,4	4,9	4,0
3,5	5,1	4,1
3,6	5,2	4,2
3,7	5,4	4,4
3,8	5,5	4,5
3,9	5,7	4,6
4,0	5,8	4,7
4,1	5,9	4,8
4,2	6,1	4,9
atd.	atd.	atd.

Tab. 3-6 Pevnostní třídy vláknobetonu v reziduálním tahu po vzniku makrotrhlin [11]

Pevnostní třídy vláknobetonu v reziduálním dostředném tahu $f_{fc,tk,res,j}$ [MPa]				
0,4	2,0	3,6	5,2	6,8
0,6	2,2	3,8	5,4	7,0
0,8	2,4	4,0	5,6	7,2
1,0	2,6	4,2	5,8	7,4
1,2	2,8	4,4	6,0	7,6
1,4	3,0	4,6	6,2	7,8
1,6	3,2	4,8	6,4	8,0
1,8	3,4	5,0	6,6	atd.

3.3.5 Zkoušky vláknobetonu

Použití jakéhokoli materiálu v konstrukci je vždy podmíněno dobrou znalostí jeho vlastností a jejich zkoušení s příslušným vyhodnocením. To stejné platí i pro cementové kompozity s rozptýlenou výztuží.

Zkoušky čerstvého vláknobetonu [10], [11]

Zkoušení čerstvého vláknobetonu se provádí podle standardizovaných zkušebních postupů shodných se zkušebními postupy obvyčejného čerstvého betonu, tedy podle souboru norem ČSN EN 12350.

Pro stanovení konzistence je vhodné, vzhledem k vláknům stabilizujícím strukturu betonu, použít zkoušku rozlitím. Naopak nevhodná je, obzvlášť u kompozitů s ocelovými vlákny, zkouška sednutím kužele nebo zkouška VeBe. Výsledkem této zkoušky je stupeň konzistence betonu.

Důležitou kontrolou čerstvého vláknobetonu je kontrola homogenity, čímž se rozumí rovnoměrné rozptýlení zrn kameniva a rovnoměrné rozptýlení vláken, a to jak po namíchání, tak po zhutnění vláknobetonu. Homogenita je základním požadavkem pro použití vláknobetonu v nosných konstrukcích a zjišťuje se vizuálně a rozplavením definovaného množství vláknobetonu a následnou extrakcí vláken, jejich vysušením zvážení.

Zkoušky ztvrdlého vláknobetonu [10], [11]

Zkoušení se rovněž provádí standardizovanými postupy podle souboru norem ČSN EN 12390, a postupy pro ověření vlastností typických pro vláknobeton, jako je zkouška ohybem. Z výsledků zkoušek ztvrdlého betonu získáváme charakteristické hodnoty pevností, modulu pružnosti a duktility vláknobetonu.

Minimální rozměr hrany zkušebních těles by měl být 150 mm, pro všechny typy zkoušek vláknobetonu. U zkoušek v osovému tahu může být rozměr tělesa menší za podmínky, že zkušební těleso bude vyříznuto z vybetonovaného tělesa větších rozměrů (s minimálním rozměrem nejmenší hrany 200 mm). Provozní zkoušky lze provádět i na menších tělesech vyřezaných z hotové konstrukce, nicméně výsledky zkoušek musíme považovat jen za informativní.

Doporučené rozměry zkušebních těles pro průkazní a provozní zkoušky dle TP FC 1-1:

- válec Ø 150/300 mm pro ověřování válcové pevnosti vláknobetonu v tlaku a jeho modulu pružnosti,
- krychle 150/150/150 mm pro ověření krychelné pevnosti vláknobetonu v tlaku a jeho pevnosti v příčném tahu,
- trámce 150/150/700 mm pro ověření pevnosti vláknobetonu v tahu za ohybu a jeho duktility (přetvořitelnosti),
- hranoly 150/150/600 mm pro ověření hranolové pevnosti vláknobetonu v tlaku a jeho modulu pružnosti.

Zkušební tělesa se musí zhotovovat vždy z homogenní směsi čerstvého vláknobetonu. Postup plnění forem a způsob zhutnění vláknobetonu je shodný s postupem plnění a zhutnění forem betonem podle ČSN EN 12390 – 2.

Nedestruktivní zkoušky vláknobetonu

Ultrazvuková impulzová metoda [6]

Ultrazvuková impulzová metoda se používá zejména pokud chceme zjistit jakost zkoušeného materiálu nebo jeho fyzikálně mechanické charakteristiky. Princip metody spočívá v opakovaném vysílání UZ vln do zkoušeného materiálu a zjišťuje se rychlost šíření UZ vlnění. Pokud se měření provede na betonu, můžeme konstatovat, že kvalitní beton bude vykazovat vyšší impulzovou rychlost UZ vlnění než beton méně kvalitní. Měření se provádí ve třech místech v čele vzorku podle obrázku 4-1. Sondy se umístí na vyznačená místa a jemně se přitlačí ke zkušebnímu tělesu. Před samotným měřením je důležité stanovit hodnotu tzv. mrtvého času. Jedná se o dobu po kterou ultrazvuk prochází sondou a vrstvou vazebného akustického prostředí. Mrtvý čas zjišťujeme na etalonu, jehož časovou charakteristiku známe. O hodnotu mrtvého času musíme opravit všechny výsledky měření.

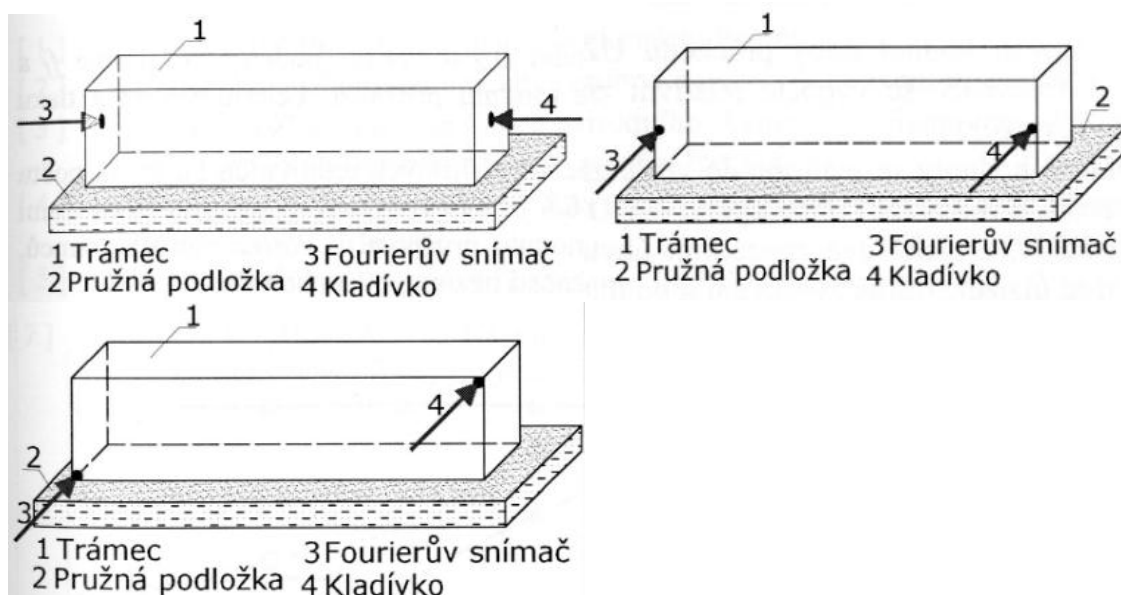


Obr. 3-5 Místa měření UZ impulzové metody[6]

Rezonanční metoda [6]

Princip metody spočívá v tom, že při mechanickém impulzu se každé tuhé těleso rozkmitá. K určení dynamických charakteristik se využívá vlastních kmitočtů podélného f_L , krouživého f_t a příčného f_f kmitání. Rezonancí označujeme jev, při kterém je kmitočet vnější budící síly shodný s vlastním kmitočtem tělesa. Pro měření se používá Fourierův analyzátor, impulzní kladívko, podložka z pěnového materiálu

a snímač zrychlení. Při měření vlastních kmitočtů podélných, kroutivých a příčných se liší umístění Fourierova snímače. Umístění snímače je znázorněno na obrázku 4-12.



Obr. 3-6 Umístění snímače pro měření f_L , f_f a f_t [6]

3.4 Výpočtový program ATENA

Výpočetní program ATENA je program určený pro simulaci chování betonových a železobetonových konstrukcí. Byl vyvinut firmou Červenka Consulting pro počítačovou simulaci železobetonových konstrukcí. ATENA vychází z deformační metody konečných prvků a používá nelineární modely materiálu. To umožňuje analyzovat chování stavební konstrukce i v kritických podmínkách, kdy dochází k porušení konstrukce. Základním nástrojem jsou pokročilé nelineární materiálové modely pro beton a betonářskou výztuž. Postupně byly vyvinuty materiálové modely umožňující simulaci cihelného a kamenného zdiva, zvláštních výztuží a vláknobetonu. Materiálové modely simulující chování vláknobetonu jsou využity v experimentální části diplomové práce. [35]

Program se používá ve velké míře v České republice, ale je rozšířen i ve světovém měřítku pro ověřování nových konstrukcí i při rekonstrukcích. Příkladem použití

v České republice může být ověření krizového chování okolních budov při stavbě administrativního centra na Karlově náměstí v Praze. [35]

Práce ve výpočtovém programu se dá rozdělit do tří částí:

- pre-processing
- nelineární MKP analýza
- post-processing.

V první části se musí definovat geometrický a konečněprvkový model potřebný pro nelineární MKP analýzu programem ATENA. Geometrickým modelem se popisuje geometrie konstrukce, materiálové charakteristiky konstrukce a okrajové podmínky.

V další části probíhá samotný nelineární výpočet metodou konečných prvků na základě nastavených parametrů v části pre-processing.

Po ukončení výpočtu program automaticky vstoupí do módu s výsledky nelineárního výpočtu konstrukce. [13]

4. Experimentální část

Experimentální část diplomové práce je zaměřena na porovnání základních materiálových vlastností betonů se stejným složením, ale s přidáním vláken různé délky a v různém poměru. Složení betonů je uvedena v tabulce 4-1. Jako rozptýlená výztuž byla použita polypropylenová vlákna Forta Ferro délky 54, 38 a 19 mm.

4.5 Zkušební tělesa

4.5.1 Výroba čerstvého betonu

Jak již bylo naznačeno v kapitole 3.3.3, je při výrobě vláknobetonu nesmírně důležité dodržet předepsanou technologii výroby pro daný typ vláken. Zkušební tělesa byla vyrobena ve čtyřech alternativách - tělesa z referenční betonové směsi a tělesa s přidaným obsahem vláken v kombinaci délek 54 mm, 38 mm a 19 mm v množství 2,0/0,5/0,5 kg, 4,0/1,0/1,0 kg a 6,0/1,5/1,5 kg na 1 m³ betonu. První číslo udává množství přidaných vláken délky 54 mm, druhé číslo znamená množství vláken délky 38 mm a poslední číslo je množství vláken délky 19 mm.



Obr. 4-1 Výroba vláknobetonu – mísení polypropylénových vláken s kamenivem

Složky byly dávkovány dle technologického předpisu a v množství uvedeném v tabulce 4-1. Betonová směs byla připravena v míchačce s nuceným oběhem. Složky byly dávkovány v pořadí hrubé těžené kamenivo (HTK) Tovačov frakce 4/8 mm, polypropylenová vlákna Forta Ferro, drobné těžené kamenivo (DTK) Zaječí frakce

0/4 mm, cement CEM I 42,5R, popílek z Chvaletic a 80% záměsové vody. Plastifikátor Sika ViscoCrete 1035 byl před přidáním smíchán se zbylou záměsovou vodou.

Při betonování první sady vzorků z referenční betonové směsi bylo pro výrobu použito více záměsové vody než u ostatních zkušebních těles, čímž se vlastnosti referenčního betonu zkreslily a porovnání s betony s vlákny by nebylo relevantní. Proto se v následujících částech experimentální části diplomové práce budou porovnávat pouze vlastnosti betonů s vlákny.

Tab. 4-1 Složení betonů

Složka		Množství na 1m ³			
		R	2,0/0,5/0,5	4,0/1,0/1,0	6,0/1,5/1,5
Cement CEM I 42,5R	kg	340	340	340	340
Popílek (Chvaletice)	kg	80	80	80	80
DTK 0/4 (Zaječí)	kg	784	784	784	784
HTK 4/8 (Tovačov)	kg	920	920	920	920
Sika ViscoCrete 1035	kg	5,00	5,77	5,77	5,77
Záměsová voda	l	180,00	162,40	166,08	165,38

Během výroby byla stanovena objemová hmotnost směsi podle ČSN EN 12350 - 6 Zkouška čerstvého betonu – Část 6: Objemová hmotnost a byla ověřena konzistence betonu v souladu ČSN EN 12350 – 5 Zkouška čerstvého betonu – Část 5: Zkouška rozlitím.

Objemová hmotnost (ČSN EN 12350 - 6) [15]

Objemová hmotnost čerstvého betonu byla stanovena z hmotnosti prázdné a naplněné nádoby o známém objemu. Objemové hmotnosti čerstvých betonů jsou uvedeny v tabulce 4-2.

Tab. 4-2 Objemová hmotnost

	OB – R	OB - 2,0/0,5/0,5	OB - 4,0/1,0/1,0	OB - 6,0/1,5/1,5
Objemová hmotnost [kg/m ³]	2310	2330	2270	2280

Z uvedených výsledků je zřejmé, že rozdíly objemových hmotností betonu a vláknobetonů nejsou příliš velké, přidaná polypropylenová vlákna nemají velký vliv na hodnotu objemových hmotností.

Zkouška rozlitím (ČSN EN 12350 – 5) [16]

Zkouška stanovuje konzistenci čerstvé betonové směsi změřením rozlití betonu na rovné desce, která je vystavena otřesům. Před začátkem zkoušky musí být deska i forma navlhčena. Po naplnění formy a odformování se směs na desce vystavuje volnému pádu z výšky 40 mm, který se opakuje patnáctkrát. Výsledky zkoušky jsou uvedeny v tabulce 4-3.

Tab. 4-3 Zkouška rozlitím

	<i>OB – R</i>	<i>OB - 2,0/0,5/0,5</i>	<i>OB - 4,0/1,0/1,0</i>	<i>OB - 6,0/1,5/1,5</i>
<i>Rozlití [mm]</i>	640x650	600x570	400x540	285x290

Přidáváním vláken do betonů stejného složení se postupně zhoršovala zpracovatelnost betonových směsí, jak je patrné ze zkoušky rozlitím.

4.5.2 Výroba a ošetřování zkušebních těles [7], [17]

Zkušební tělesa ve tvaru krychle 150/150/150 mm a kvádrů 100/100/400 mm byla vyrobena v souladu s technickou normou ČSN EN 12390 – 2 Zkoušení ztvrdlého betonu – Část 2: Výroba a ošetřování zkušebních těles pro zkoušení pevnosti.

Pro výrobu trámců byly použity formy ocelové, pro výrobu krychlí formy plastové. Z důvodu snadnější odformování byly formy předem ošetřeny tenkou vrstvou separačního prostředku Separol N – SIKA. Plnění se provádělo ve dvou vrstvách, na vibračním stole byl beton dostatečně zhutněn, následně byl odstraněn přebytečný beton a povrch byl urovňován zednickou lžící.

Naplněné formy byly uloženy pod fólií. Po 24 hodinách byla zkušební tělesa odformována a uložena v plechové nádobě s teplotou 20°C a relativní vlhkostí 95% až do doby těsně před zkoušením.

4.6 Fyzikálně mechanické vlastnosti zkušebních těles

4.6.1 Stejnorodost

Před vlastním měřením fyzikálně mechanických vlastností bylo zapotřebí ověřit homogenitu zkušebních těles. Měření probíhalo podle ČSN 732011 – Nedestruktivní zkoušení betonových konstrukcí. Stejnorodost se posuzovala pomocí variačních součinitelů pevnosti v tlaku, pevnosti v tahu, rychlosti šíření ultrazvukových (UZ) vln a objemové hmotnosti. Beton je považován za stejnorodý, pokud variační koeficienty jsou menší než normou předepsané hodnoty. Variační součinitel se stanoví z následujícího vztahu:

$$V_x = \frac{s_x}{m_x} \cdot 100$$

kde s_x je směrodatná odchylka souboru hodnot,

m_x je aritmetický průměr hodnot materiálové vlastnosti [18].

Pro ověření rychlosti šíření UZ vln bylo využito UZ impulzové metody, při které se zjišťuje doba průchodu UZ vln v betonovém tělese. Bylo použito měřicí soupravy TICO se sondami o frekvenci 82 kHz. Princip UZ impulzové metody je podrobněji popsán v kapitole 3.4.1.

Výsledné variační součinitelé shrnuje tabulka 4-4. Vstupní hodnoty pro určení stejnorodosti zkušebních těles jsou uvedeny v příloze P1 a P3.

Tab. 4-4 Stejnorodost betonu podle ČSN EN 732011

Označení	Variační koeficient				Hodnocení
	Pevnost v tlaku	Pevnost v tahu	Rychlost šíření UZ vln	Objemová hmotnost	
OB - R	0,56	5,68	0,30	0,51	Stejnorodý
OB - 2,0/0,5/0,5	0,79	3,03	0,65	1,17	Stejnorodý
OB - 4,0/1,0/1,0	1,60	2,29	0,63	0,94	Stejnorodý
OB - 6,0/1,5/1,5	4,36	6,55	1,37	1,47	Stejnorodý
ČSN 732011	12,00	16,00	3,00	2,50	

Z výše uvedených výsledků lze konstatovat, že zkušební tělesa všech betonových záměsů vyhovují požadavkům normy a můžeme je označit za stejnorodé.

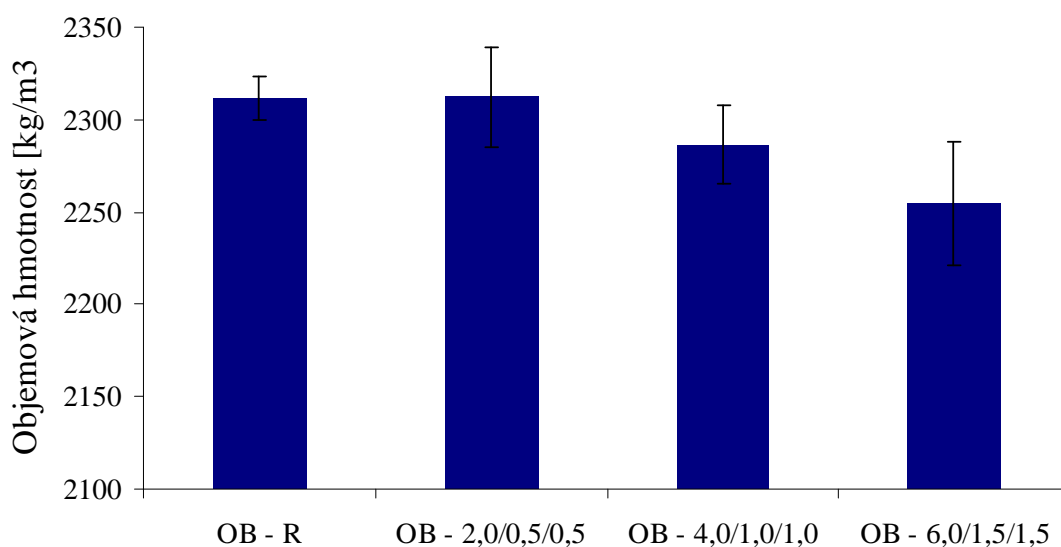
4.6.2 Objemová hmotnost

Po odformování byly všechny vzorky změřeny, zváženy a hodnoty zaznamenány. Při stanovení objemové hmotnosti se postupovalo v souladu s ČSN EN 12390 – Zkoušení ztvrdlého betonu – Část 7: Objemová hmotnost ztvrdlého betonu. [19]

Vstupní hodnoty pro výpočet jsou uvedeny v příloze P1. Výsledky zkoušky jsou uvedeny v tabulce 4-5, graficky jsou výsledky vyjádřeny na obrázku 4-2.

Tab. 4-5 Objemová hmotnost ztvrdlého betonu

Označení	Objemová hmotnost [kg/m ³]	Směrodatná odchylka [kg/m ³]	Variační koeficient [%]
OB – R	2310	11,8	0,51
OB - 2,0/0,5/0,5	2310	27,1	1,17
OB - 4,0/1,0/1,0	2290	21,4	0,94
OB - 6,0/1,5/1,5	2260	33,1	1,47



Obr. 4-2 Objemová hmotnost ztvrdlého betonu

Porovnáním výsledků objemových hmotností zjistíme, že rozdíly objemových hmotností jsou nepatrné, dosahující maximální hodnoty 2,5%, což může být zapříčiněno nepřesnostmi při měření. Referenční směsi a směsi s obsahem vláken v poměru

2,0/0,5/0,5 kg se neliší, i když se musí brát v úvahu zkreslené výsledky referenční směsi vlivem většího množství záměsové vody. Pokles objemové hmotnosti u betonových směsí s množstvím vláken v poměru 4,0/1,0/1,0 kg a 6,0/1,5/1,5 kg je o 1,12 % respektive 2,50 % od objemové hmotnosti betonové směsi s obsahem vláken 2,0/0,5/0,5 kg.

4.6.3 Informativní pevnost v tlaku

Informativní pevnost v tlaku byla zjišťována v souladu technické normy ČSN 731371 – Nedestruktivní zkoušení betonu – Ultrazvuková impulzová metoda zkoušení betonu. Měření se provádělo na krychlích 150/150/150 mm a trámčích 100/100/400 mm měřicí soupravou TICO se sondami s frekvencí 82 kHz. Postup měření je uveden v kapitole 3.3.5 Zkoušky vláknobetonu.

Informativní pevnost v tlaku se stanoví ze vzorce:

$$R_{be} = 9,9 \cdot v_{L3}^2 - 56 \cdot v_{L3} + 87,8,$$

kde R_{be} je pevnost betonu v MPa,

v_{L3} je rychlost šíření ultrazvuku v trojrozměrném prostředí v km/s [6].

V tabulce 4-6 jsou uvedeny výsledky měření informativní pevnosti betonu v tlaku. Vstupní hodnoty jsou uvedeny v příloze P3.

Tab.4-6 Informativní pevnost betonu v tlaku stanovená na krychlích a na kvádrech

Označení	Informativní pevnost v tlaku stanovená na krychlích [MPa]	Informativní pevnost v tlaku stanovená na kvádrech [MPa]
OB - R	32,70	32,1
OB - 2,0/0,5/0,5	31,30	33,5
OB - 4,0/1,0/1,0	29,90	30,5
OB - 6,0/1,5/1,5	31,80	30,1

Vzorec pro stanovení pevnosti byl vytvořen před více než třiceti lety a již neodpovídá dnešním betonům. Hodnoty získané ze vzorce vycházejí nižší, než je skutečná pevnost [6].

4.6.4 Pevnost v tlaku

Pevnost v tlaku zkušebních těles byla stanovena podle technické normy ČSN EN 12390 – 3 Zkoušení ztvrdlého betonu – Část 3: Pevnost v tlaku zkušebních těles. Měření se provádělo na zkušebních tělesech tvaru krychle s délkou hrany 150 mm. Tělesa se zatěžovala plynule rychlostí 0,5 MPa/s, bez nárazu, až do chvíle, kdy v tělese vznikly takové tlakové síly, které zkušební těleso porušily. Při zkoušení byl použit lis Form + Test. Pevnost betonu v tlaku byla určena podle vztahu:

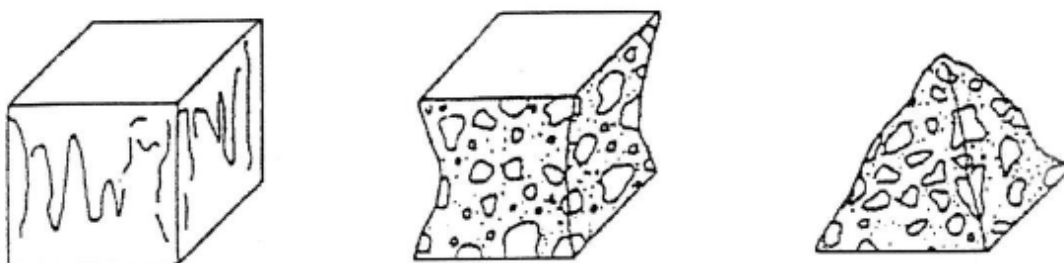
$$f_c = \frac{F}{A_c}$$

kde f_c je pevnost betonu v tlaku v MPa,

F je maximální zatížení při porušení v N,

A_c je průřezová plocha tělesa, na kterou působí zatížení v tlaku v mm² [20].

Na obrázku 4-3 jsou uvedeny typy vyhovujících porušení podle ČSN EN 12390 – 3.

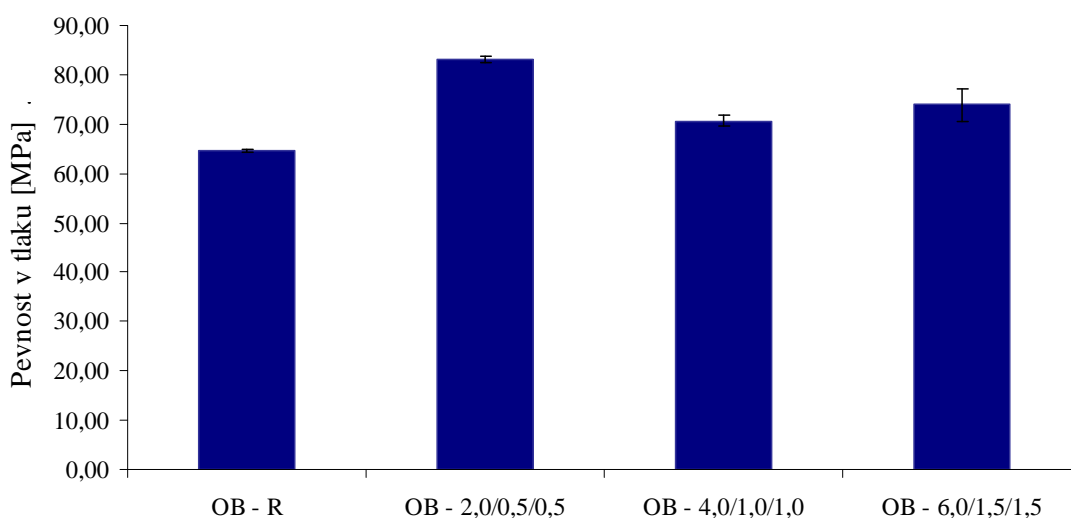


Obr. 4-3 Vyhovující porušení při tlakové zkoušce [20]

Výsledkem zkoušky je porovnání pevností v tlaku betonů s polypropylenovými vlákny v kombinaci vláken 2,0/0,5/0,5, 4,0/1,0/1,0 a 6,0/1,5/1,5 délky 54, 38 a 19 mm. Výsledky zkoušky jsou uvedeny v tabulce 4-7 a na obrázku 4-4, vstupní hodnoty pak v příloze P1.

Tab. 4-7 Pevnost v tlaku

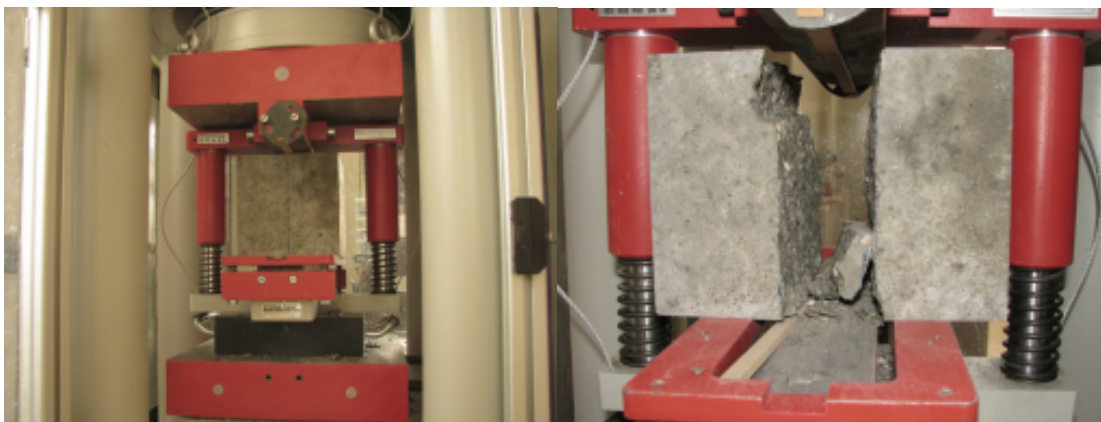
Označení	Pevnost v tlaku [MPa]	Směrodatná odchylka [MPa]	Variační koeficient [%]
OB - R	64,5	0,36	0,56
OB - 2,0/0,5/0,5	83,0	0,66	0,79
OB - 4,0/1,0/1,0	70,5	1,13	1,60
OB - 6,0/1,5/1,5	74,0	3,22	4,36



Obr. 4-4 Pevnost v tlaku

Z uvedených výsledků zkoušky můžeme konstatovat, že k nejvyššímu nárůstu pevnosti betonu v tlaku došlo u betonové směsi s množstvím vláken v poměru 2,0/0,5/0,5 kg. U zbylých dvou směsí s obsahem vláken v poměru 4,0/1,0/1,0 kg a 6,0/1,5/1,5 kg byla naměřena pevnost v tlaku nižší o 17,7 % a 12,2 % než u betonu s množstvím vláken v poměru 2,0/0,5/0,5 kg. Výsledky zkoušky těles z referenční směsi nejsou objektivní, vzhledem k chybě při výrobě zkušebních těles této sady, proto zde není uvedeno jejich porovnání s výsledky zkoušek zkušebních těles s rozptýlenou výztuží.

4.6.5 Pevnost v příčném tahu



Obr. 4-5 Umístění zkušebního tělesa, porušení zkušebního tělesa

Zkoušení pevnosti betonu v příčném tahu probíhalo v souladu ČSN EN 12390 – 6 Zkoušení ztvrdlého betonu – Část 6: Pevnost v příčném tahu zkušebních těles. Byla zkoušena tělese tvaru krychle s délkou hrany 150 mm. Umístění zkušebního tělesa do lisu a výsledné porušení tělesa je uvedeno na obrázku 4-5. Zatěžování probíhalo plynule rychlostí 0,05 MPa/s lisem Form + Test až do porušení vzorku. Pevnost v příčném tahu je dána následujícím vztahem:

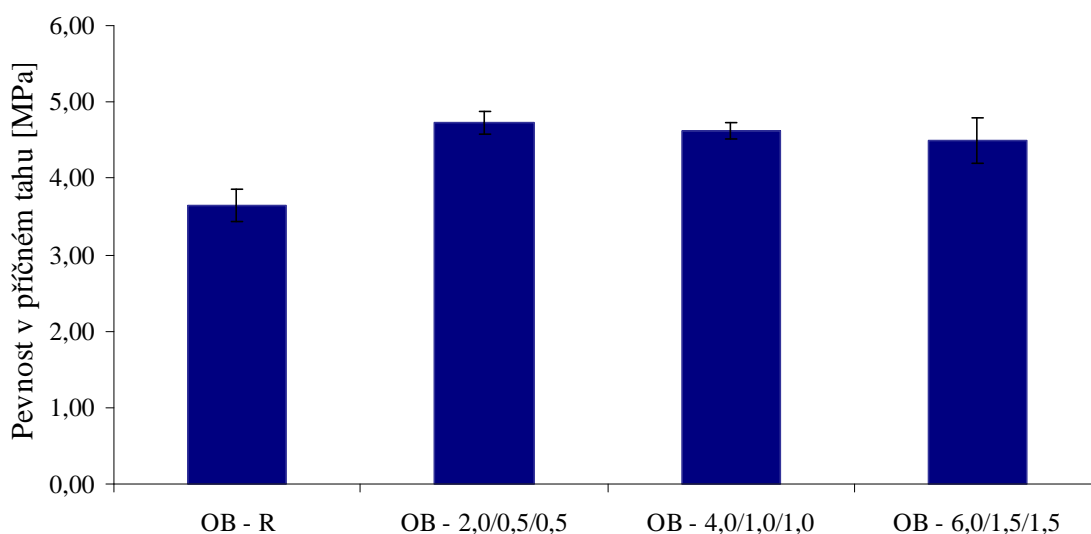
$$f_{ct} = \frac{2 \cdot F}{\pi \cdot L \cdot d}$$

kde f_{ct} je pevnost v příčném tahu betonu v MPa,
 F je maximální zatížení při porušení v N,
 L je délka dotykové přímky tělesa v mm,
 d je zvolený příčný rozměr tělesa v mm [24].

Výsledky zkoušek jsou uvedeny v tabulce 4-8, graficky na obrázku 4-6. Vstupní hodnoty jsou uvedeny v příloze P1.

Tab. 4-8 Pevnost v příčném tahu

Označení	Pevnost v příčném tahu [MPa]	Směrodatná odchylka [MPa]	Variační koeficient [%]
OB – R	3,65	0,21	5,68
OB - 2,0/0,5/0,5	4,75	0,14	3,03
OB - 4,0/1,0/1,0	4,65	0,11	2,29
OB - 6,0/1,5/1,5	4,50	0,29	6,55



Obr. 4-6 Pevnost betonu v příčném tahu

Je patrné, že větší množství záměsové vody při výrobě referenční směsi negativně ovlivnilo výsledky pevnosti v příčném tahu, proto nebude tato sada do srovnání zahrnuta. Výsledky ostatních zkoušení těles s vlákny jsou vyrovnané, dochází jen k mírnému poklesu pevnosti v tahu v závislosti na množství vláken. Konkrétně dochází k poklesu pevnosti o 2,2 % u betonové směsi s množstvím vláken v poměru 4,0/1,0/1,0 kg a o 5,6 % v případě betonu s obsahem vláken v poměru 6,5/1,5/1,5 kg vzhledem k betonu s obsahem vláken v poměru 2,0/0,5/0,5 kg. Rozdíly v pevnostech jsou zanedbatelné a mohou být způsobeny chybou měření.

4.6.6 Statický modul pružnosti v tlaku

Měření statického modulu pružnosti v tlaku probíhalo v souladu s normou ČSN ISO 6784 – Stanovení statického modulu pružnosti v tlaku. Na začátku měření se vyvodilo

základní napětí 0,5 MPa a zaznamenala se hodnota na všech přístrojích. Napětí se v průběhu měření plynule zvyšovalo až do hodnoty odpovídající jedné třetině pevnosti betonu v tlaku. Vyvozené napětí bylo udržováno 60 sekund a v následujících 30 sekundách se odečetly hodnoty ze všech přístrojů. Po dokončení měření bylo provedeno plynulé zatěžování až do porušení zkušebního tělesa. Pokud se pevnost vzorku lišila o více než 20 % od pevnosti v tlaku, měření se zopakovalo. Na obrázku 4-7 je uvedeno umístění trámce do zkušebního lisu. [22]

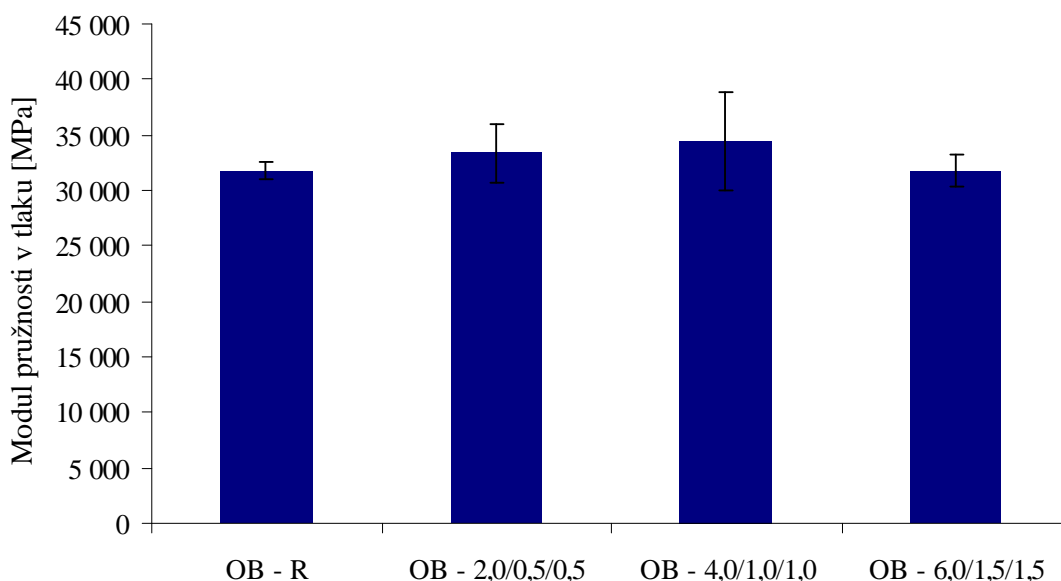


Obr. 4-7 Umístění zkušebního tělesa do lisu

Výsledky zkoušky jsou uvedeny v tabulce 4-9 a v grafu na obrázku 4-8. Vstupní hodnoty pro vyhodnocení zkoušky v příloze P2.

Tab. 4-9 Statický modul pružnosti v tlaku

Označení	Modul pružnosti v tlaku E_c [MPa]	Směrodatná odchylka [MPa]	Variační koeficient [%]
OB - R	32 000	802	2,52
OB - 2,0/0,5/0,5	33 500	2610	7,83
OB - 4,0/1,0/1,0	34 500	4497	13,06
OB - 6,0/1,5/1,5	32 000	1387	4,37



Obr. 4-8 Statický modul pružnosti v tlaku

Z tab. 4-9 a obr. 4-8 vyplývá, že přidání vláken nijak výrazně modul pružnosti v tlaku neovlivnilo. Nejvyššího statického modulu pružnosti v tlaku dosáhla sada zkušebních těles s množstvím vláken v poměru 4,0/1,0/1,0 kg. U zkušebních těles s přidavkem vláken v poměru 2,0/0,5/0,5 kg a 6,0/1,5/1,5 kg byl zjištěn statický modul pružnosti v tlaku nižší o 3,0 % a 7,8 % než u směsi s vlákny v poměru 2,0/0,5/0,5 kg. Referenční směs není do srovnání zahrnuta z důvodu vyšší dávky záměsové vody při výrobě betonu.

4.6.7 Modul pružnosti a přetvárnosti v tahu ohybem

Měření bylo provedeno podle technické normy ČSN 736174 – Stanovení modulu pružnosti a přetvárnosti betonu ze zkoušky v tahu ohybem. Zkušební tělesa byla tvaru kvádru 100/100/400 mm.

Zkušební těleso bylo osazeno do lisu obdobným způsobem, jako u zkoušky pevnosti v tahu ohybem podle ČSN ISO 4013 a ČSN ISO 1920. Po osazení průhyboměru se začalo se samotným měřením. Zkušební těleso bylo zatěžováno stupňovitě silami F_1 až F_n . Při jejich působení byla vyvozována napětí zvyšující se o 10 % předpokládané pevnosti v tahu ohybem. Po ukončení působení síly F_1 byl určen celkový průhyb tělesa

a těleso bylo zatíženo silou F_2 (dvojnásobek síly F_1) a opět byl odečten celkový průhyb. Poté se snížilo zatížení na hodnotu síly F_1 a byl určen pružný průhyb zkušebního tělesa. Tímto způsobem se pokračovalo až do dosažení síly F_n , v násobcích síly F_1 . [23]



Obr. 4-9 Osazení zkušebního tělesa do lisu při měření modulu pružnosti a přetvárnosti v tahu ohybem

Modul pružnosti v tahu ohybem E se určí ze vztahu:

$$E = \frac{F \cdot l}{f_e \cdot b \cdot h} \left(0,213 \cdot \frac{l^2}{h^2} + 0,46 \right)$$

Modul přetvárnosti v tahu ohybem E_0 se určí ze vztahu:

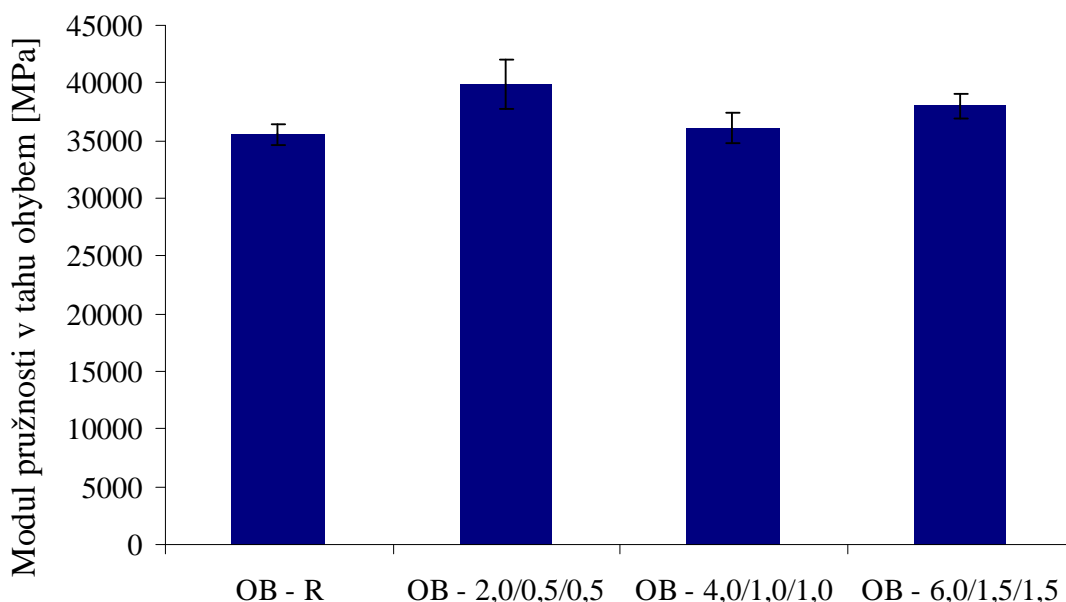
$$E_0 = \frac{F \cdot l}{f_{tot} \cdot b \cdot h} \left(0,213 \cdot \frac{l^2}{h^2} + 0,46 \right)$$

- kde
- F je zatížení trámce v N,
 - f_e je pružný průhyb trámce v mm,
 - f_{tot} je celkový průhyb trámce v mm,
 - b je šířka trámce v mm,
 - h je výška trámce v mm,
 - l je rozpětí trámce v mm [23].

Naměřené hodnoty modulu pružnosti v tahu ohybem jsou uvedeny v tabulce 4-10 a na obrázku 4-10, hodnoty modulu přetvárnosti v tabulce 4-11 a na obrázku 4-11. Vstupní hodnoty pro tuto zkoušku jsou uvedeny v příloze P2.

Tab. 4-10 Modul pružnosti v tahu ohybem

Označení	Modul pružnosti v tahu ohybem E [MPa]	Směrodatná odchylka [MPa]	Variační koeficient [%]
OB - R	35 500	914	2,57
OB - 2,0/0,5/0,5	40 000	2 150	5,38
OB - 4,0/1,0/1,0	36 000	1 278	3,54
OB - 6,0/1,5/1,5	38 000	1 064	2,80

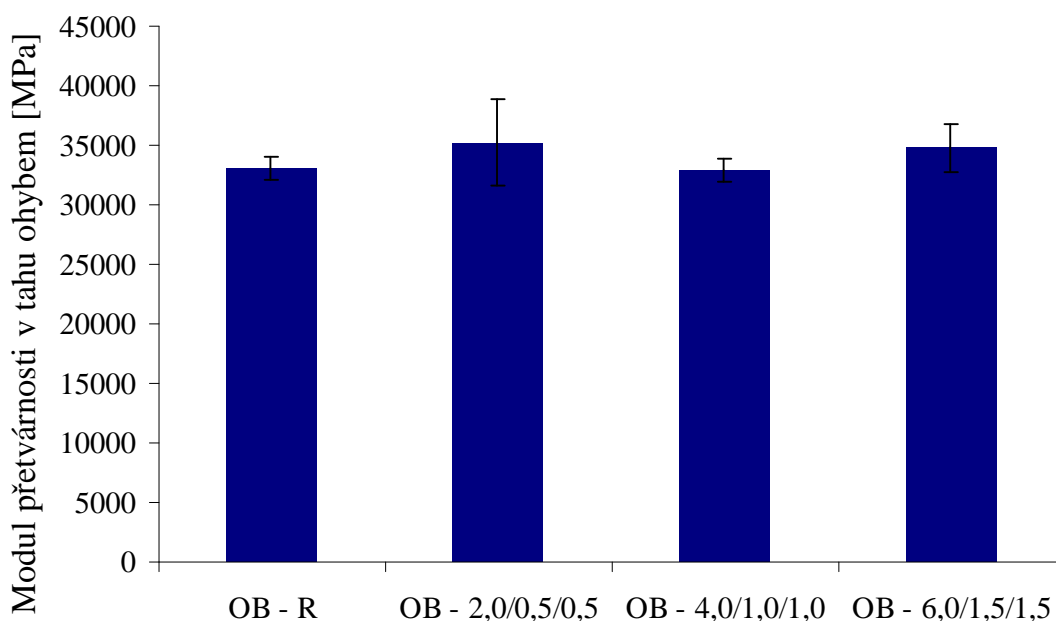


Obr. 4-10 Modul pružnosti v tahu ohybem

Nejvyšší modul pružnosti v tahu ohybem byl dosažen u sady zkušebních těles s množstvím vláken v poměru 2,0/0,5/0,5 kg. U zkušebních těles s obsahem vláken v poměru 4,0/1,0/1,0 kg byla naměřena hodnota modulu pružnosti v tahu ohybem nižší o 11,1 %, u zkušebních těles s množstvím vláken 6,0/1,5/1,5 kg došlo k poklesu modulu pružnosti v tahu ohybem o 5,3 % vzhledem k hodnotám zjištěným na sadě zkušebních těles s obsahem vláken v poměru 2,0/0,5/0,5 kg. Referenční směs není ve srovnání zmiňována z důvodu vyššího množství záměsové vody.

Tab. 4-11 Modul přetvárnosti v tahu ohybem

Označení	Modul přetvárnosti v tahu ohybem E_0 [MPa]	Směrodatná odchylka [MPa]	Variační koeficient [%]
OB - R	33 000	1 017	3,08
OB - 2,0/0,5/0,5	35 000	3 602	10,23
OB - 4,0/1,0/1,0	33 000	968	2,94
OB - 6,0/1,5/1,5	35 000	2 019	5,80



Obr. 4-11 Modul přetvárnosti v tahu ohybem

Z uvedených výsledků modulu přetvárnosti v tahu ohybem lze konstatovat, že nejvyšší hodnota modulu přetvárnosti byla naměřena na zkušebních vzorcích s obsahem vláken v množství 2,0/0,5/0,5 kg a 6,0/1,5/1,5 kg. V případě těles s množstvím vláken v poměru 4,0/1,0/1,0 kg byla hodnota nižší o 9,4 %. S modulem přetvárnosti v tahu ohybem referenční směsi ve srovnání neuvažujeme.

4.6.8 Dynamický modul pružnosti v tlaku a tahu, dynamický modul pružnosti ve smyku

Dynamický modul pružnosti v tlaku a tahu byl stanoven dvojím způsobem – rezonanční metodou zkoušení betonu a ultrazvukovou impulzní metodou zkoušení betonu, na zkušebních tělesech tvaru kvádrů 100/100/400 mm a v případě ultrazvukové impulzové

metody navíc na tělesech tvaru krychle 150/150/150 mm. Dynamický modul pružnosti ve smyku se stanovil ze zkoušek provedených rezonanční metodou na zkušebních tělesech tvaru kvádry 100/100/400 mm.

Postup měření a výpočtu probíhal v souladu s technickými normami ČSN 731372 – Nedestruktivní zkoušení betonu – Rezonanční metoda zkoušení betonu a ČSN 731371 – Nedestruktivní zkoušení betonu – Ultrazvuková impulzová metoda zkoušení betonu.



Obr. 4-12 Měření vlastní frekvence kroutivého kmitání f_t

Ultrazvuková impulzová metoda

Princip ultrazvukové impulzové metody je popsán v kapitole 3.3.5 Zkoušky vláknobetonu. Pro měření byla použita souprava TICO s frekvencí sond 82 kHz. UZ impulzovou metodou byla stanovena hodnota dynamického modulu pružnosti v tlaku a tahu podle vzorce:

$$E_{bu} = \rho \cdot v_L^2 \cdot \frac{1}{k^2} \cdot 10^{-6}$$

- kde E_{bu} je dynamický modul pružnosti v MPa,
 ρ je objemová hmotnost zkušebního tělesa v kg.m^3 ,
 v_L je rychlost šíření ultrazvuku v m.s^{-1} ,
 k je koeficient rozměrnosti bez rozměru [6].

Rezonanční metoda

Princip rezonanční metody je popsán v kapitole 3.3.5 Zkoušky vláknobetonu. Z naměřených hodnot vlastních kmitočtů podélného, kroutivého a příčného kmitání se vypočítá dynamický modul pružnosti v tahu a tlaku E_{cr} dvěma způsoby (z rezonančních frekvencí podélného - E_{crL} a příčného - E_{crf} kmitání) podle vztahů:

$$E_{crL} = 4 \cdot L^2 \cdot f_L^2 \cdot \rho$$

$$E_{crf} = 0,0789 \cdot c_1 \cdot L^4 \cdot f_f^2 \cdot \rho \cdot \frac{1}{i^2}$$

kde f_L, f_f jsou vlastní frekvence podélného a příčného kmitání v kHz,

L je délka zkušební tělesa v m,

ρ je objemová hmotnost v $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$,

c_1 je korekční součinitel,

i je poloměr setrvačnosti v m [6].

Rozdíl mezi vypočtenými hodnotami dynamického modulu pružnosti v tlaku a tahu z frekvencí podélného a příčného kmitání se nesmí lišit o více než 5 %.

Další charakteristika určována rezonanční metodou je dynamický modul pružnosti ve smyku G_{cr} , která se vypočítá z následujícího vzorce:

$$G_{cr} = 4 \cdot k \cdot L^2 \cdot f_t^2 \cdot \rho$$

kde k je součinitel závislý na tvaru průřezu tělesa,

L je délka zkušební tělesa v m,

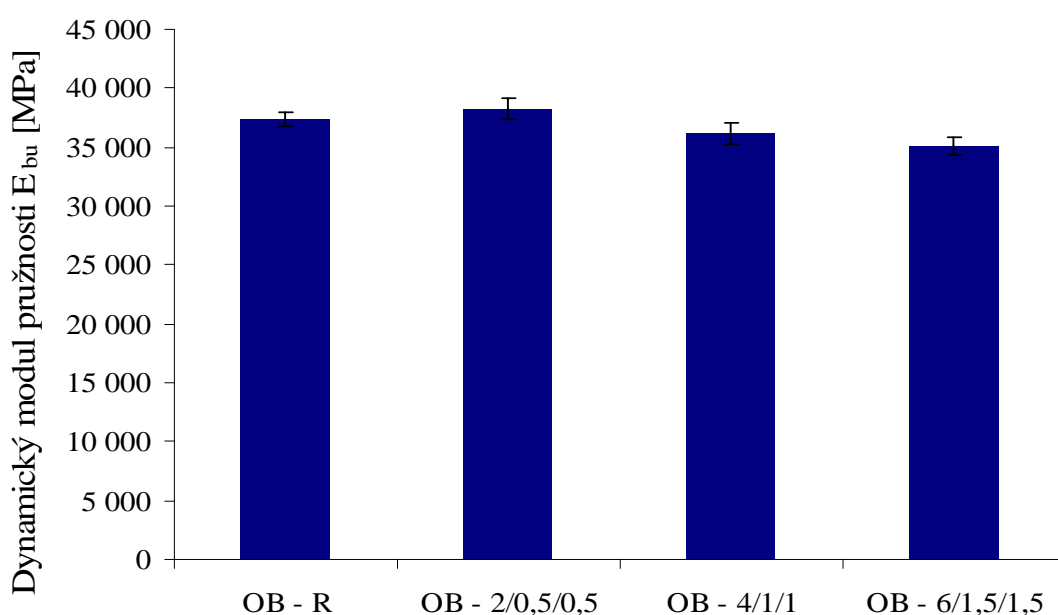
f_t je vlastní frekvence kroutivého kmitání v kHz,

ρ je objemová hmotnost v $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ [6].

V tabulce 4-12 a na obrázku 4-13 jsou uvedeny aritmetické průměry naměřených hodnot dynamického modulu pružnosti v tlaku a tahu UZ impulzivní metodou. Vstupní hodnoty jsou uvedeny v příloze P3.

Tab. 4-12 Dynamický modul pružnosti v tahu a tlaku E_{bu} stanovený UZ impulzovou metodou

Označení	Dynamický modul pružnosti v tahu a tlaku stanovený na kvádrech E_{bu} [MPa]	Směrodatná odchylka [MPa]	Variační koeficient [%]
OB - R	37 400	574	1,54
OB - 2,0/0,5/0,5	38 300	863	2,25
OB - 4,0/1,0/1,0	36 100	941	2,60
OB - 6,0/1,5/1,5	35 100	764	2,18

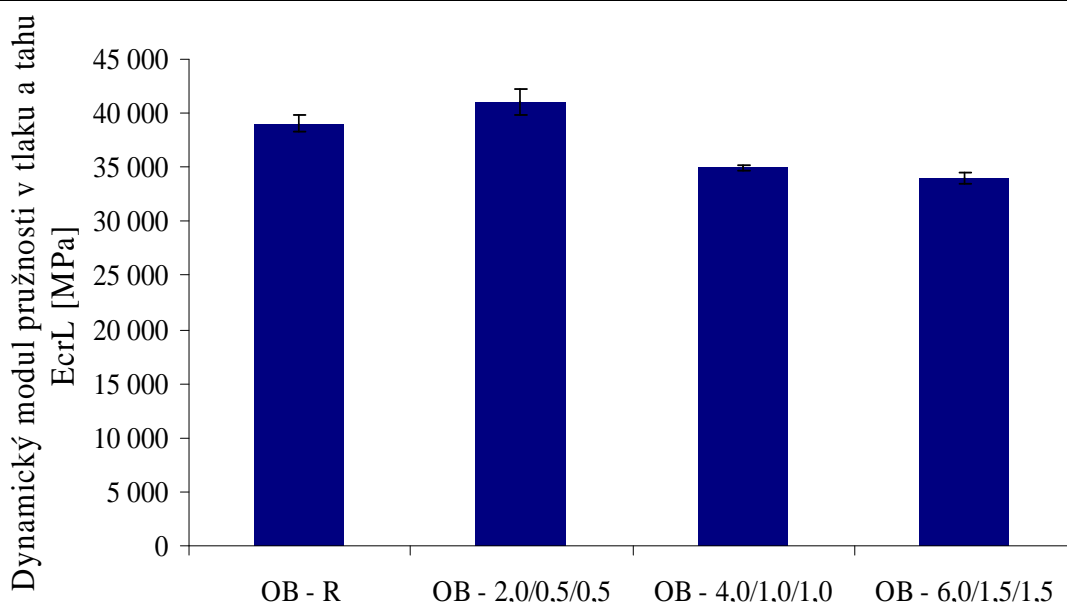

Obr. 4-13 Dynamický modul pružnosti v tahu a tlaku E_{bu} stanovený UZ impulzovou metodou

Jak je patrné z výsledků dynamického modulu v tahu a tlaku určených UZ impulzovou metodou, jsou výsledné hodnoty poměrně vyrovnané pro všechny sady betonů. Nejvyšší hodnoty dynamického modulu pružnosti v tahu a tlaku dosáhla sada zkušebních těles s množstvím přidaných vláken v poměru 2,0/0,5/0,5 kg. Betony s obsahem vláken vyšším – v poměru 4,0/1,0/1,0 kg a 6,0/1,5/1,5 kg dosáhly nižších hodnot dynamického modulu pružnosti v tahu a tlaku než beton s nejnižším množstvím přidaných vláken, a to o 6,1 % a 9,1 %. Srovnání s referenční směsí není objektivní z důvodu vyššího množství záměsové vody při výrobě zkušebních těles betonu bez vláken. Porovnání s referenční směsí není objektivní, proto není uvedeno.

Hodnoty dynamického modulu pružnosti v tahu a tlaku určeného rezonanční metodou jsou uvedeny v tabulkách 4-13 a 4-14 a na obrázcích 4-14 a 4-15, hodnoty dynamického modulu pružnosti ve smyku jsou uvedeny v tabulce 4-15 a na obrázku 4-16. Vstupní hodnoty jsou zaznamenány v příloze P3.

Tab. 4-13 Dynamický modul pružnosti v tahu a tlaku E_{crL} stanovený rezonanční metodou

Označení	Dynamický modul pružnosti v tahu a tlaku E_{crL} [MPa]	Směrodatná odchylka [MPa]	Variační koeficient [%]
OB - R	39 000	751	1,93
OB - 2,0/0,5/0,5	41 100	1278	3,11
OB - 4,0/1,0/1,0	35 000	289	0,83
OB - 6,0/1,5/1,5	34 000	514	1,51

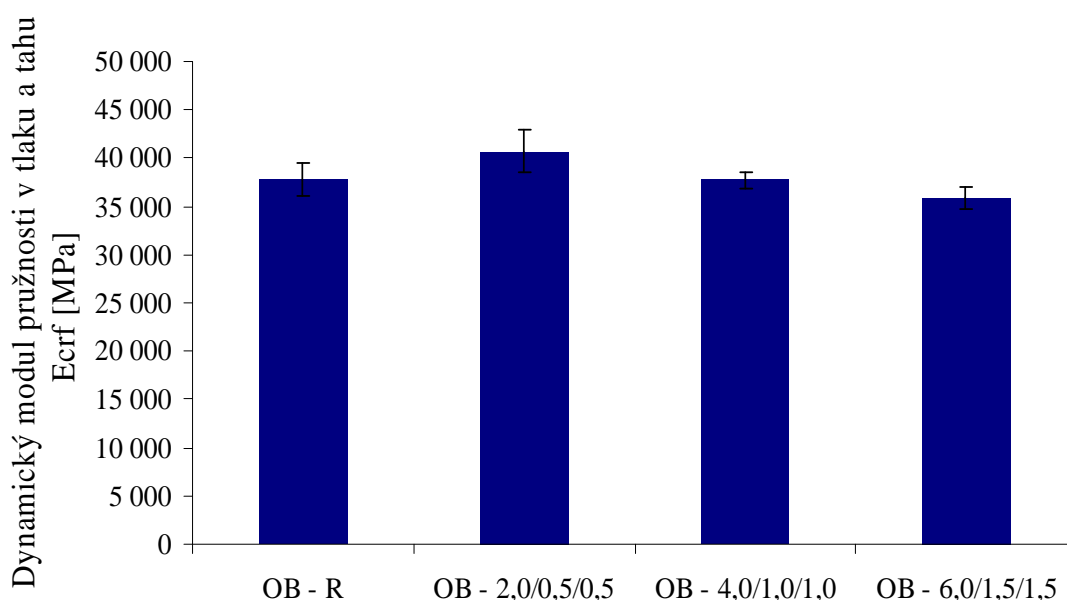


Obr. 4-14 Dynamický modul pružnosti v tahu a tlaku E_{crL} stanovený rezonanční metodou

Z výsledků dynamického modulu pružnosti v tahu a tlaku stanovených z frekvencí podélného kmitání je zřejmé, že nejvyšší hodnotu dynamického modulu pružnosti v tahu a tlaku, určeného rezonanční metodou, dosáhla, obdobně jako u měření UZ impulzovou metodou, zkušební tělesa s nejnižším množstvím přidávaných vláken – 2,0/0,5/0,5 kg. Zkušební sady s přidávanými vlákny v množství 4,0/1,0/1,0 kg a 6,0/1,5/1,5 kg dosáhly o 17,4 % a 20,1 % nižších hodnot než sada s množstvím vláken v poměru 2,0/0,5/0,5 kg.

Tab. 4-14 Dynamický modul pružnosti v tahu a tlaku E_{crf} stanovený rezonanční metodou

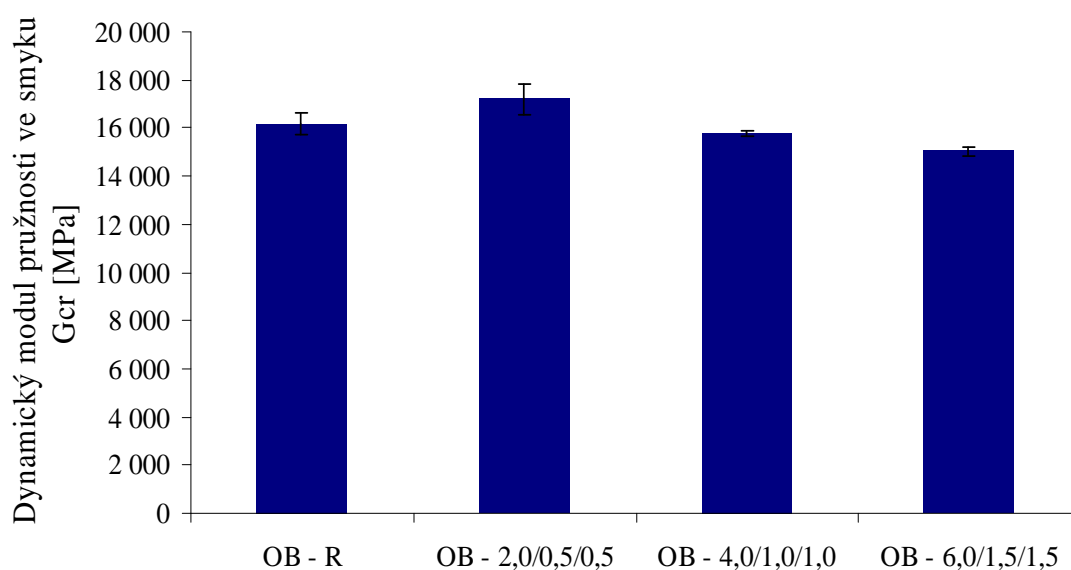
Označení	Dynamický modul pružnosti v tahu a tlaku E_{crf} [MPa]	Směrodatná odchylka [MPa]	Variační koeficient [%]
OB - R	37 800	1734	1,16
OB - 2,0/0,5/0,5	40 700	2178	1,62
OB - 4,0/1,0/1,0	37 700	841	0,32
OB - 6,0/1,5/1,5	35 900	1164	0,52


Obr. 4-15 Dynamický modul pružnosti v tahu a tlaku E_{crf} stanovený rezonanční metodou

Výsledky dynamického modulu pružnosti v tlaku a tahu stanoveného z frekvencí příčného kmitání jsou vyrovnanější a pokles hodnot není tak výrazný jako u hodnot určených z vlastních frekvencí podélného kmitání. Nejvyšších hodnot dosahovala zkušební tělesa s množstvím vláken v poměru 2,0/0,5/0,5 kg, tělesa s množstvím vláken v poměru 4,0/1,0/1,0 kg dosahovala hodnot o 8,0 % nižších a tělesa s množstvím vláken v poměru 6,0/1,5/1,5 kg dosahovala hodnot o 13,4 % nižších.

Tab. 4-15 Dynamický modul pružnosti ve smyku G_{cr}

Označení	Dynamický modul pružnosti ve smyku G_{cr} [MPa]	Směrodatná odchylka [MPa]	Variační koeficient [%]
OB - R	16 200	437	2,70
OB - 2,0/0,5/0,5	17 200	660	3,83
OB - 4,0/1,0/1,0	15 800	120	0,76
OB - 6,0/1,5/1,5	15 000	187	1,24

Obr. 4-16 Dynamický modul pružnosti ve smyku G_{cr}

Přidáním vláken do betonové směsi v poměru 2,0/0,5/0,5 kg se dosáhlo nejvyšších hodnot dynamického modulu pružnosti ve smyku. Přidáním vyššího množství vláken se hodnoty dynamického modulu snížily. V případě vláken v množství 4,0/1,0/1,0 kg o 8,9 % a v případě vláken v množství 6,0/1,5/1,5 kg o 14,7 %. Porovnání s betonovou směsí bez rozptýlené výztuže zde není zmíněno z důvodu, většího množství přidané záměsové vody při výrobě zkušebních těles.

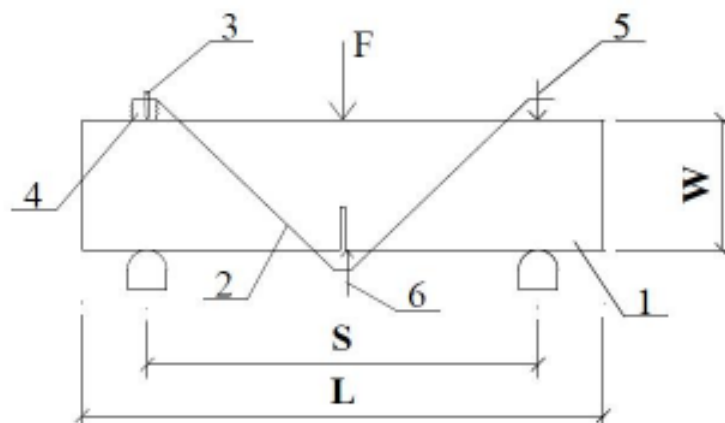
4.6.9 Lomové parametry



Obr. 4-17 Zkouška tříbodovým ohybem

Lomová mechanika je nezbytná pro popis chování konstrukcí s trhlinami. Jejím cílem je sledování procesů, které vedou k poškození a lomu konstrukčního prvku, ale i hledání řídicích fyzikálních zákonů a matematických modelů degradace materiálů. [5]

Určování lomových parametrů se realizovalo zatěžováním tříbodovým ohybem na zkušebních tělesech tvaru kvádrů a o rozměrech 100/100/400 mm (obr. 4-18). Tělesa byla v polovině dodatečně opatřena diamantovou okružní pilou zářezem do hloubky 1/3 výšky průřezu. Tělesa byla uložena do lisu Hecker FPZ 100/10, při vzdálenosti podpor 300 mm. Zatěžování probíhalo plynule za přírůstků deformace 0,05 mm/min. Při zkoušce byla sledována zatěžovací síla a průhyb. Průhyb byl sledován pomocí indukčnostního snímače TT 1 mm nad podporou zkušebního tělesa pomocí tuhé ocelové konstrukce průhyboměru tzv. pastičky. K tomuto postupu se přistoupilo z důvodu mnohem větší přesnosti, než při umístění indukčnostního snímače v polovině rozpětí. Síla působila v polovině rozpětí, v místě zářezu, který simuloval případnou trhlinu v konstrukci. Délka měření každého tělesa se pohybovala okolo 45 minut a výstup z měření obsahoval 7 000 – 15 000 řádků dat, která se dále zpracovávala. Schéma umístění tělesa do lisu je znázorněn na obrázku 4-19.

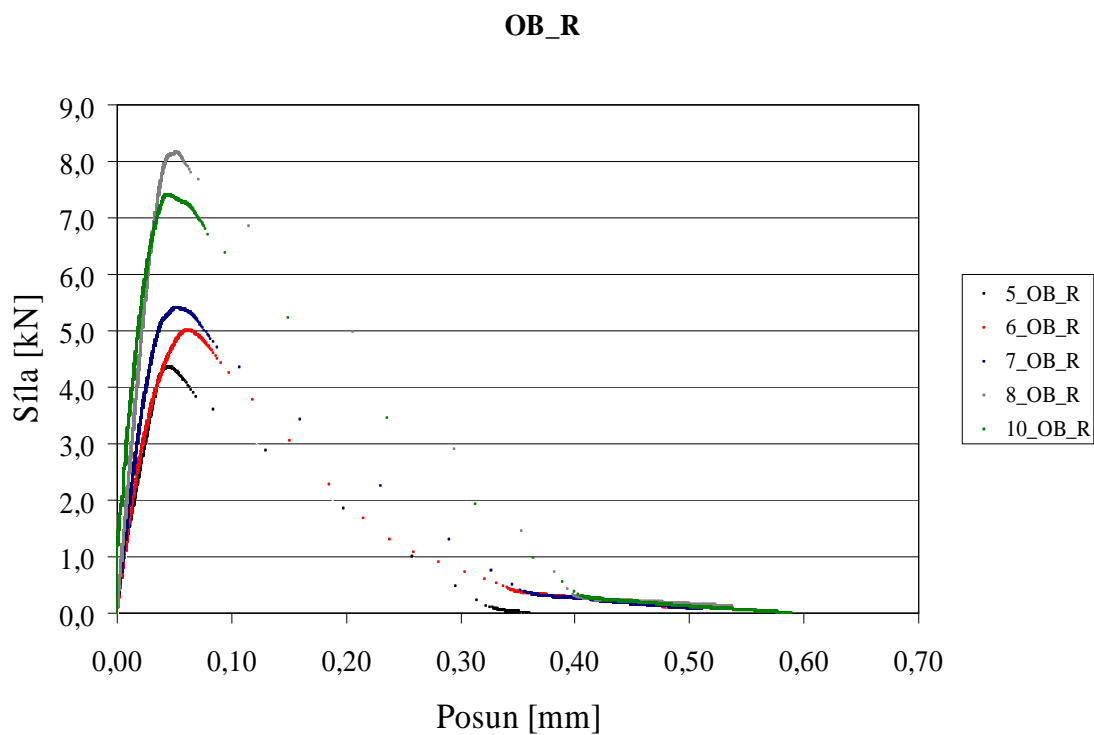


- 1 – zkušební těleso
- 2 – rámová konstrukce průhyboměru
- 3 – snímač svislých deformací
- 4 – pružná podložka
- 5 – rektifikační šrouby
- 6 – rektifikační šroub v místě měření průhybu

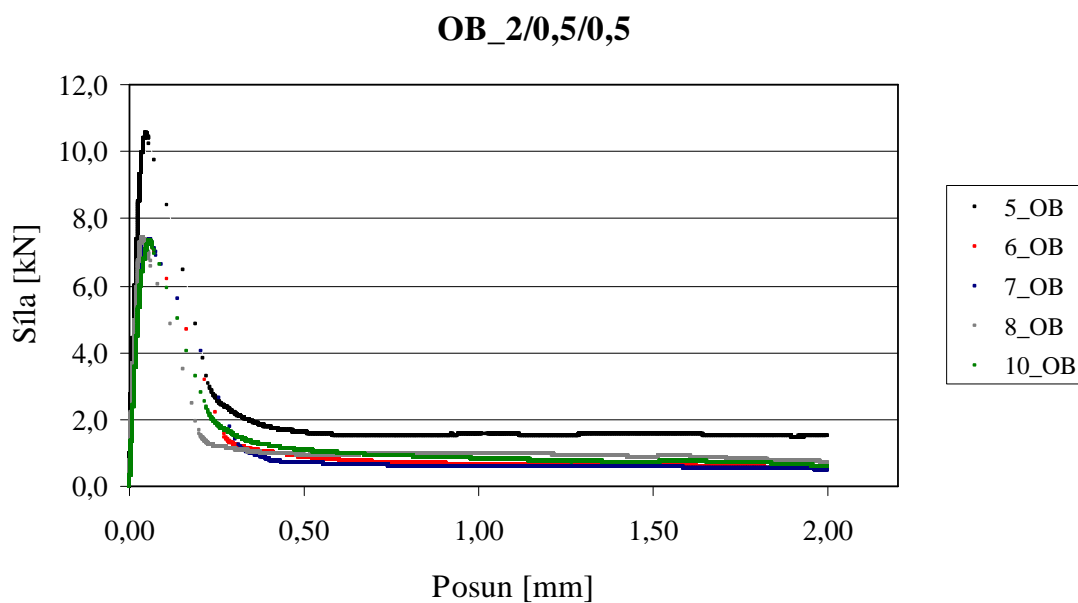
Obr. 4-18 Schéma zatěžování těles při zjišťování lomových parametrů [4]

Měření se provádělo na pěti trámcích od každé kombinace vláken a na pěti trámcích referenční směsi. Z každé sady pěti vzorků se vybraly první tři vzorky, jejichž hodnoty se dále upravovaly a na kterých se v programu StiCrack určovaly základní lomové parametry – statický modul pružnosti určený programem StiCrack E_{SC} , efektivní lomová houževnatost K_{Ic} , specifická lomová práce W_F a specifická lomová energie G_F .

Výsledky měření všech zkoušených vzorků jsou uvedeny na obrázcích 4-20, 4-21, 4-22, 4-23, kde je v zatěžovacím diagramu uvedena závislost posunu na odpovídající síle působící na zkušební těleso.

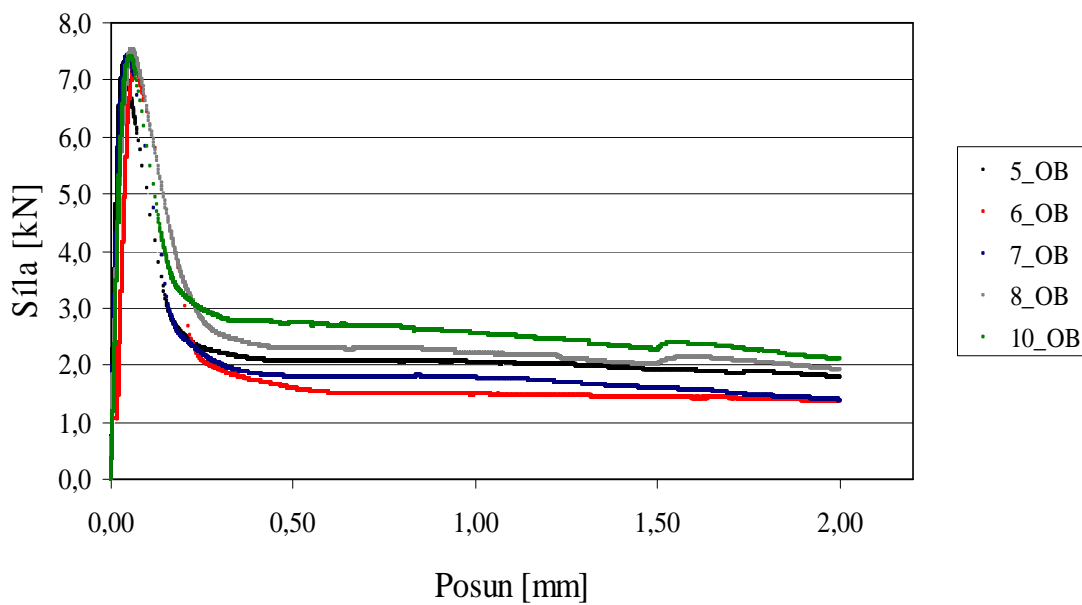


Obr. 4-19 Zatěžovací diagram zkušebních těles bez vláken



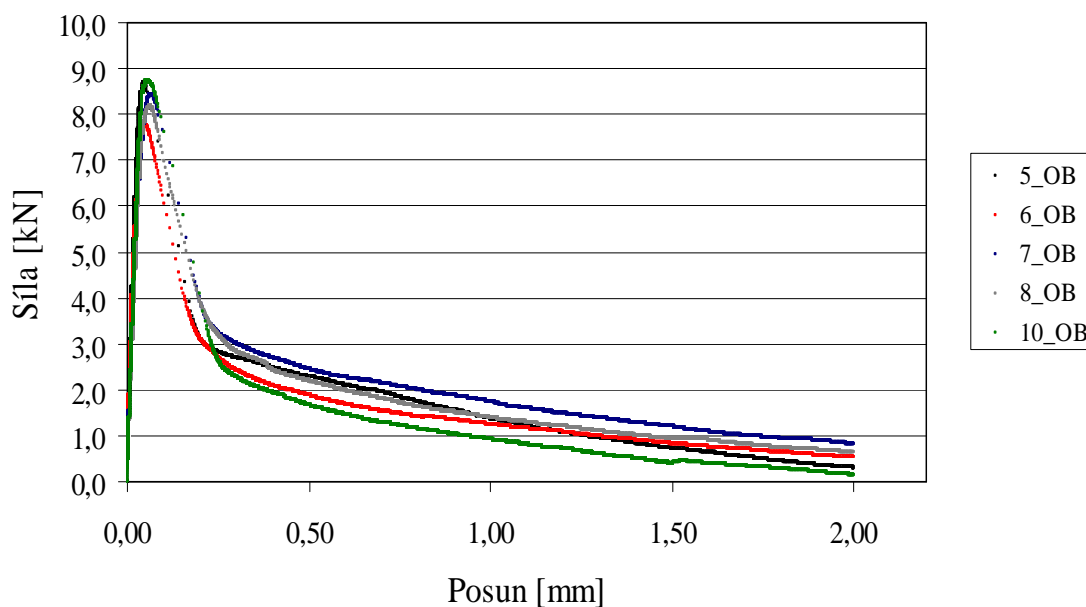
Obr. 4-20 Zatěžovací diagram zkušebních těles s vlákny v poměru 2,0/1,0/1,0 kg

OB_4,0/1,0/1,0



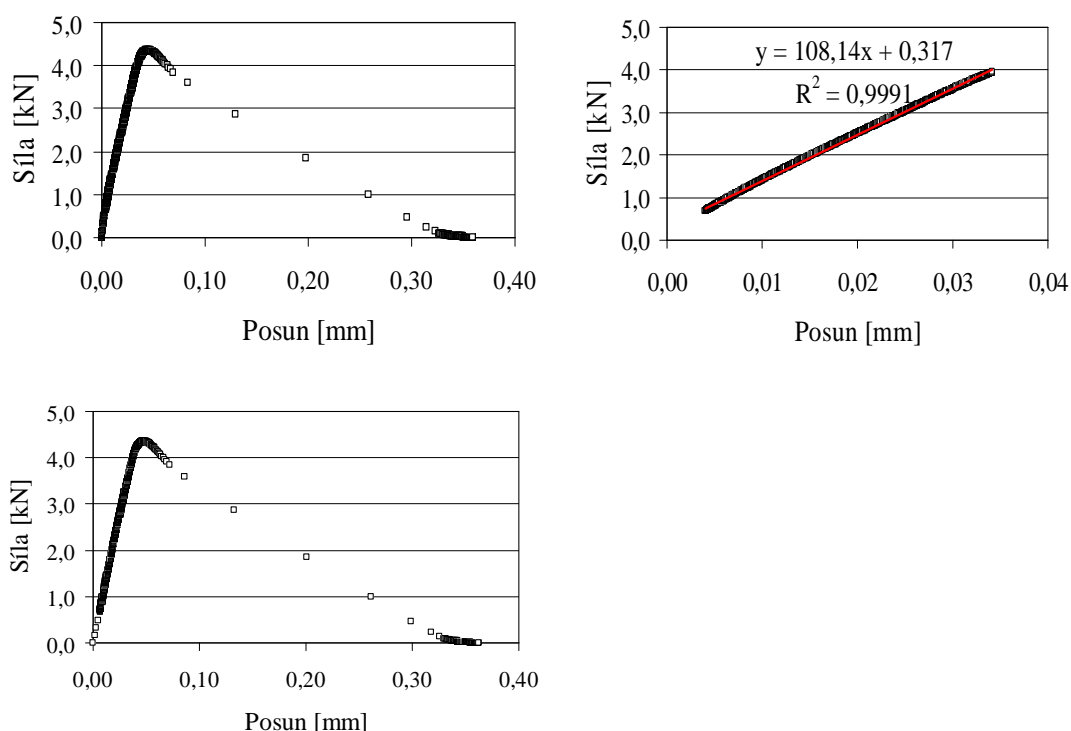
Obr. 4-21 Zatěžovací diagram zkušebních těles s vlákny v poměru 4,0/1,0/1,0 kg

OB_6,0/1,5/1,5



Obr. 4-22 Zatěžovací diagram zkušebních těles s obsahem vláken v poměru 6,0/1,5/1,5 kg

Výsledky získané na tělesech, zkoušených ve zkušebním lisu, indukčností snímačem nebylo možno ihned použít pro získání lomových parametrů hned z několika důvodů. Při každém měření vznikla chyba v důsledku vyvození počáteční síly na trámec při osazení do lisu, která je ve výstupních údajích označena jako „software zero“. O tuto hodnotu bylo nutno opravit všechny výsledky měření. V dalším kroku byly odstraněny všechny hodnoty, které zjevně neodpovídaly průběhu závislosti síly a průhybu vzniklé spojením všech naměřených hodnot. Pro správné vyhodnocení lomových parametrů je zapotřebí, aby počátek zatěžování probíhal lineárně. Bylo tedy nutné počáteční část grafu upravit tak, aby hodnoty byly lineární. Toho se docílilo tím, že se stoupající částí grafu proložila přímka a body, které nebyly lineární se postupně vymazávaly až do té doby, než se hodnota spolehlivosti R^2 blížila k číslu 1. Při R^2 blízké jedné se z rovnice přímky $y = ax + b$ vyjádřila hodnota x , o kterou se celý graf posunul. Body které bylo nutno odstranit se pro přehlednost nahradily lineárními body vypočítanými z rovnice přímky. Postup úpravy dat je znázorněn na následujícím obrázku 4-24.

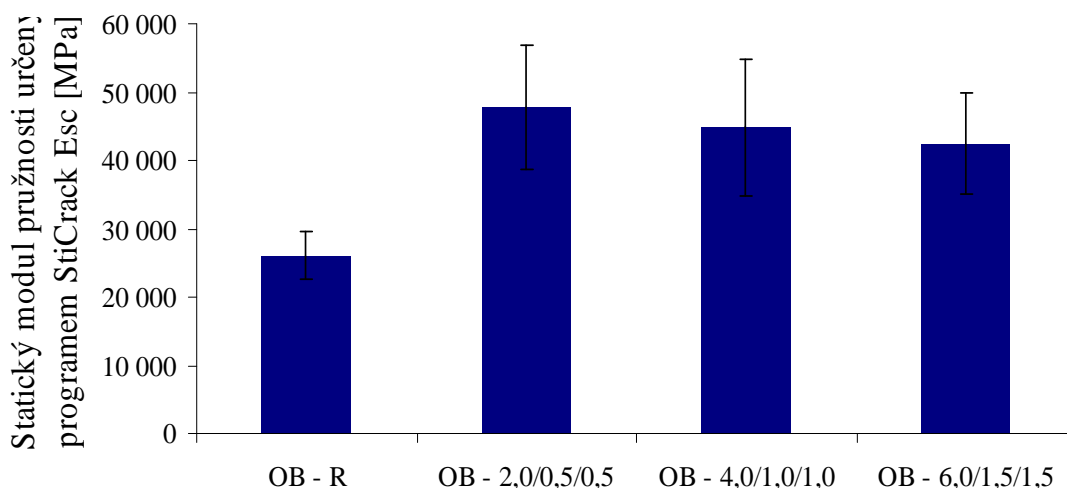


Obr. 4-23 Graf bez úprav, proložení grafu přímkou, výsledný graf s nahrazenými nelineárními hodnotami

Takto upravené hodnoty se použily jako vstupní hodnoty pro výpočet lomových parametrů v programu StiCrack, který je dostupný na internetových stránkách [39]. Výsledné lomové parametry jsou uvedeny v následujících tabulkách a na následujících obrázcích. Vstupní hodnoty pak v příloze P4.

Tab. 4-16 Lomové parametry – statický modul pružnosti určený programem StiCrack E_{sc}

Označení	Statický modul pružnosti E_{sc} [MPa]	Směrodatná odchylka s [Mpa]	Variační koeficient [%]
OB - R	26 000	3595	13,77
OB - 2,0/0,5/0,5	48 000	9056	18,97
OB - 4,0/1,0/1,0	45 000	9954	22,18
OB - 6,0/1,5/1,5	42 500	7421	17,50

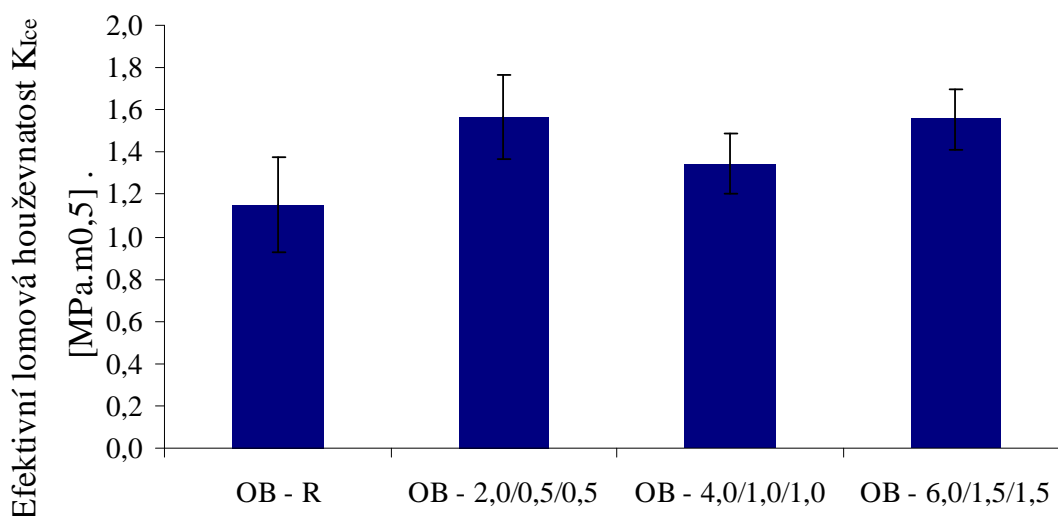


Obr. 4-24 Lomové parametry – statický modul pružnosti určený programem StiCrack E_{sc}

Výsledky statického modulu pružnosti určené programem StiCrack dokazují, že nejvyšší hodnoty statického modulu pružnosti dosáhla zkušební tělesa s obsahem vláken v poměru 2,0/0,5/0,5. Ve srovnání s touto sadou zkušebních těles dosáhla zkušební tělesa s množstvím vláken v poměru 4,0/1,0/1,0 o 6,7 % nižší hodnoty a zkušební tělesa s množstvím vláken v poměru 6,0/1,5/1,5 o 12,0 % nižší hodnoty. Větší množství přidané záměsové vody při výrobě referenční směsi se v tomto případě výrazně projevuje a proto není srovnání vláknobetonů s referenční směsí uvedeno.

Tab. 4-17 Lomové parametry – Efektivní lomová houževnatost K_{Ice}

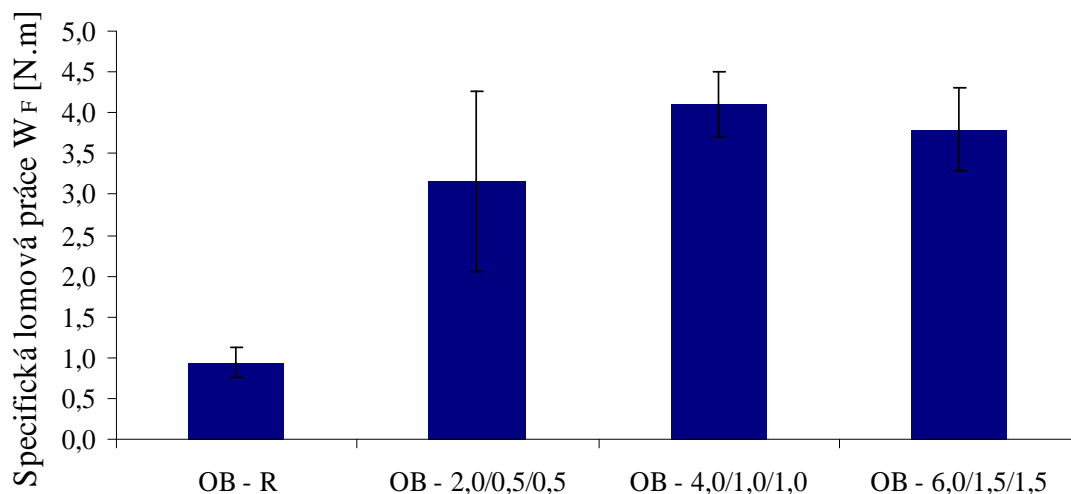
Označení	Efektivní lomová houževnatost K_{Ice} [MPa.m ^{1/2}]	Směrodatná odchylka s [MPa.m ^{1/2}]	Variační koeficient [%]
OB - R	1,153	0,227	19,66
OB - 2,0/0,5/0,5	1,566	0,199	12,70
OB - 4,0/1,0/1,0	1,344	0,142	10,59
OB - 6,0/1,5/1,5	1,556	0,143	9,17


Obr. 4-25 Lomové parametry – Efektivní lomová houževnatost K_{Ice}

Z výsledků uvedených v tabulce 4-17 a na obrázku 4-26 je zřejmé, že přidáním vláken v poměru 2,0/0,5/0,5 kg a 6,0/1,5/1,5 kg bylo dosaženo nejvyšších hodnot efektivní lomové houževnatosti. U zkušebních těles s vlákny v poměru 4,0/1,0/1,0 kg byla tato hodnota o 16,5 % nižší. Srovnání s referenční směsí není v důsledku vyššího množství přidané záměsové vody objektivní, proto zde není zmíněno.

Tab.4-18 Lomové parametry – Specifická lomová práce W_F

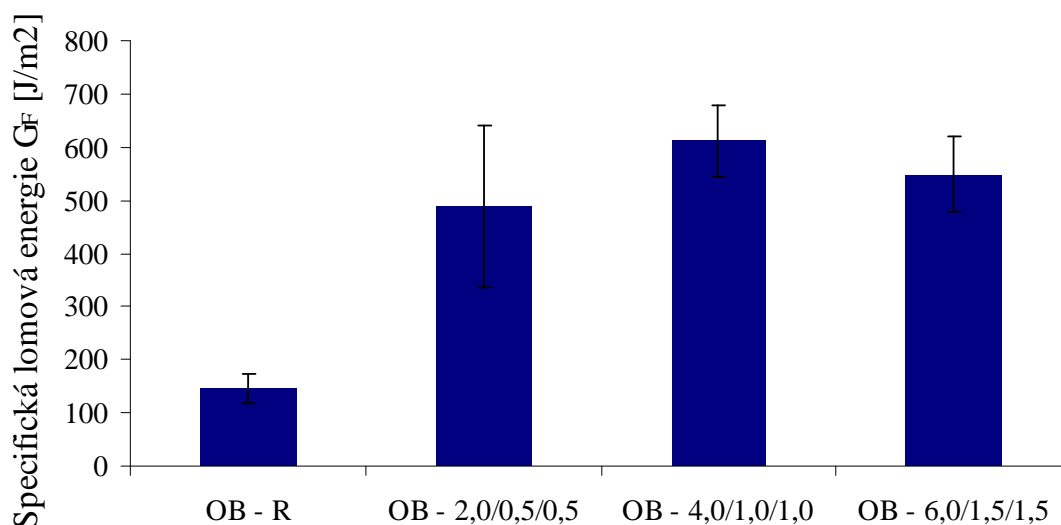
Označení	Specifická lomová práce W_F [N.m]	Směrodatná odchylka s [N.m]	Variační koeficient [%]
OB - R	0,939	0,192	20,47
OB - 2,0/0,5/0,5	3,160	1,100	34,82
OB - 4,0/1,0/1,0	4,103	0,405	9,87
OB - 6,0/1,5/1,5	3,790	0,509	13,44

Obr. 4-26 Lomové parametry – Specifická lomová práce W_F

Z výsledků specifické lomové práce vyplývá, že nejvyšší hodnoty byly naměřeny na zkušebních tělesech s množstvím vláken v poměru 4,0/1,0/1,0 kg. U zbylých dvou sad vláknobetonů byly naměřeny hodnoty nižší – u zkušebních těles s vlákny v poměru 2,0/0,5/0,5 kg o 29,8 % a u zkušebních těles s vlákny v poměru 6,0/1,5/1,5 kg o 8,3 %. Vzhledem k většímu množství přidané záměsové vody při výrobě referenční směsi se v předchozích měřeních s výsledky měření zkušebních těles bez vláken neuvažovalo. Při stanovení Specifické lomové práce je vliv množství záměsové vody nižší a můžeme tedy z výsledků na obrázku 4-26 vypočítat, že přidáním rozptýlené výztuže se parametr W_F zvýší až čtyřnásobně.

Tab. 4-19 Lomové parametry – Specifická lomová energie G_F

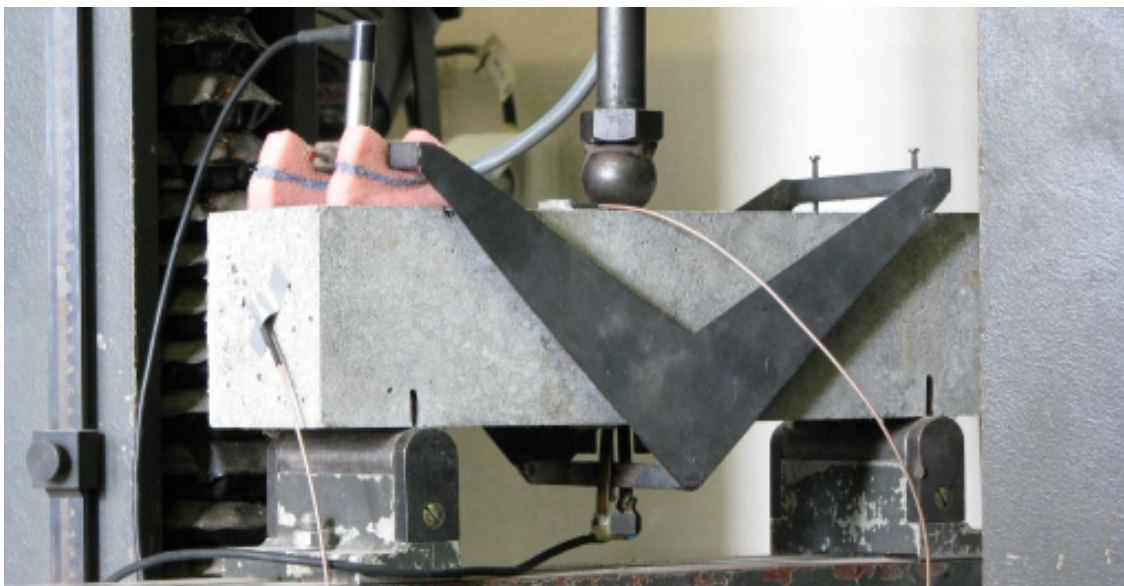
Označení	Specifická lomová energie G_F [J/m ²]	Směrodatná odchylka s [J/m ²]	Variační koeficient [%]
OB - R	146,3	26,9	18,39
OB - 2,0/0,5/0,5	488,4	153,1	31,34
OB - 4,0/1,0/1,0	611,6	66,5	10,87
OB - 6,0/1,5/1,5	548,9	70,6	12,86



Obr. 4-27 Lomové parametry – specifická lomová energie G_F

Obdobně jako u specifické lomové práce dosáhla nejvyšších hodnot specifické lomové energie tělesa s přidanými vlákny v poměru 4,0/1,0/1,0 kg. Následovala tělesa s obsahem vláken v poměru 6,0/1,5/1,5 kg, která dosáhla o 11,4 % nižší hodnoty a tělesa s obsahem vláken v poměru 2,0/0,5/0,5 kg, která dosáhla o 25,2 % nižší hodnoty. Srovnání s referenční směsí by nebylo zcela objektivní, ovšem podobně jako při stanovení specifické lomové práce má množství záměsové vody menší vliv na výsledky také při stanovení specifické lomové energie a můžeme s výsledky měření zkušebních těles bez vláken uvažovat. Při pohledu na graf na obrázku 4-27 je jasné, že rozptýlená výztuž výrazně ovlivní specifickou lomovou energii. Hodnota lomového parametru G_F se vlivem přidaných vláken zvýšila až čtyřnásobně – při množství rozptýlené výztuže v poměru 4,0/1,0/1,0 kg.

4.6.10 Akustická emise [14], [25]



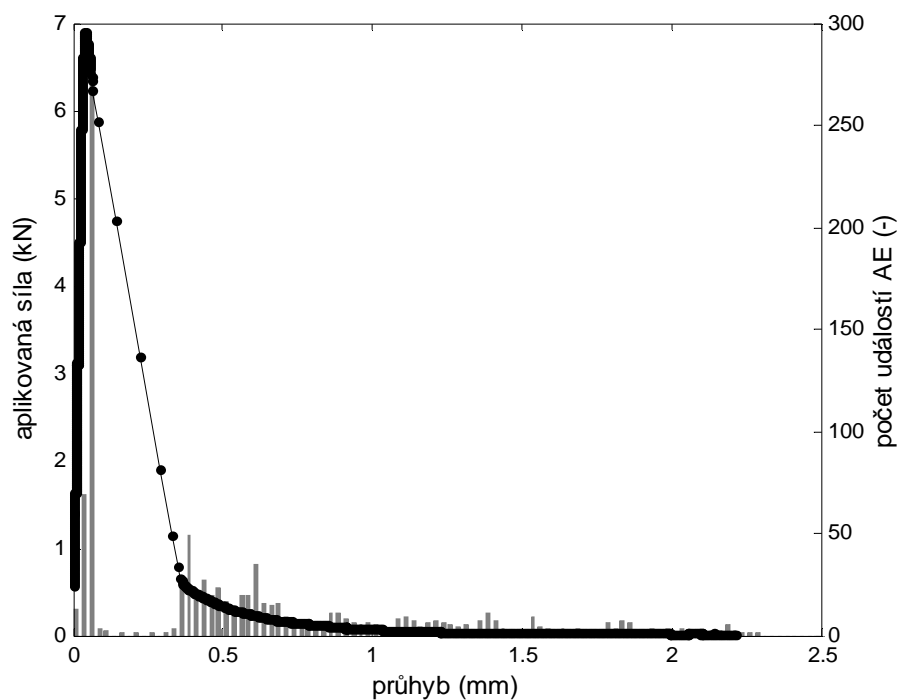
Obr. 4-28 Měření akustické emise

Kvalita materiálu se vždy určovala především poklepem – tedy akusticky. Na základě odezvy na úder se odhadovala skrytá vada. Dnešní akustické metody jsou nesrovnatelně přesnější a nejsou založeny na subjektivním posouzení, jak tomu bylo dříve, nicméně stále vychází z buzení a příjmu zvuku. [14]

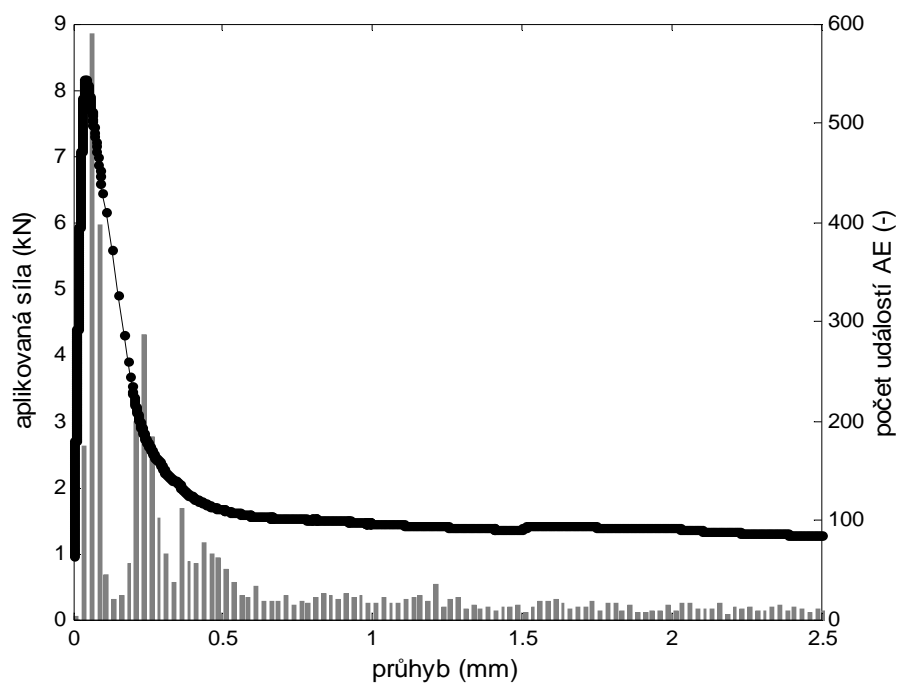
Akustickou emisí označujeme diagnostickou metodu založenou na fyzikálním jevu, při kterém se pozorují akustické signály vysílané namáhaným tělesem. Řadí se mezi pasivní inkohrentní metody, využívající postupné vlnové pulsy, což znamená, že neovlivňuje měřenou konstrukci a podává informace o momentálním dynamickém stavu materiálu. Signály akustické emise doprovázejí dynamické procesy v materiálu, které se projevují postupným elastickým vlněním. Zdrojem vlnění je náhlé uvolnění energie v materiálu. [25]

Při měření akustické emise bylo zapotřebí sítě snímačů citlivých pro dané frekvenční pásmo a speciální elektronické zařízení. Základní součástí každého měřicího zařízení pro měření akustické emise byl měřicí kanál, který transformuje napěťovou vlnu na elektrický signál, zesiluje jej a rozlišuje podle amplitudy a frekvence. [25]

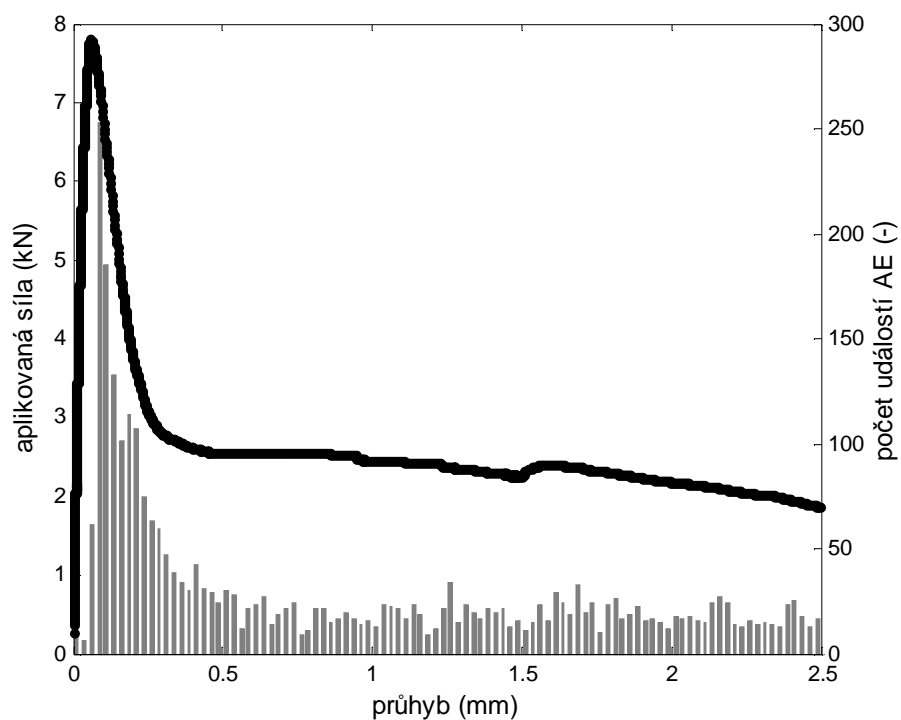
Výsledky akustické emise jsou uvedeny v následujících grafech.



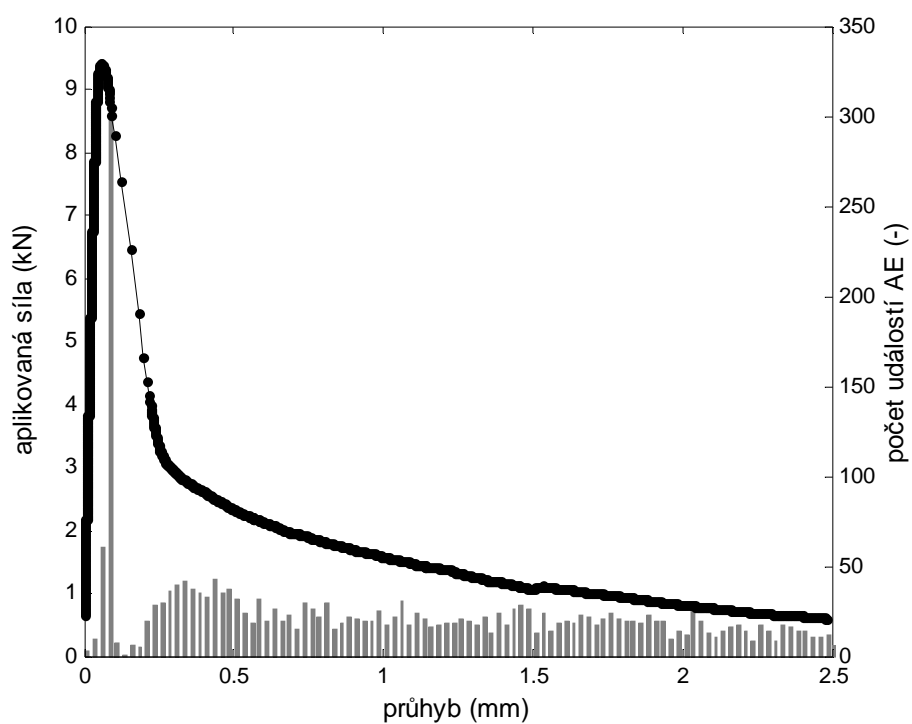
Obr. 4-29 Výsledky akustické emise na zkušebním tělese OB - R



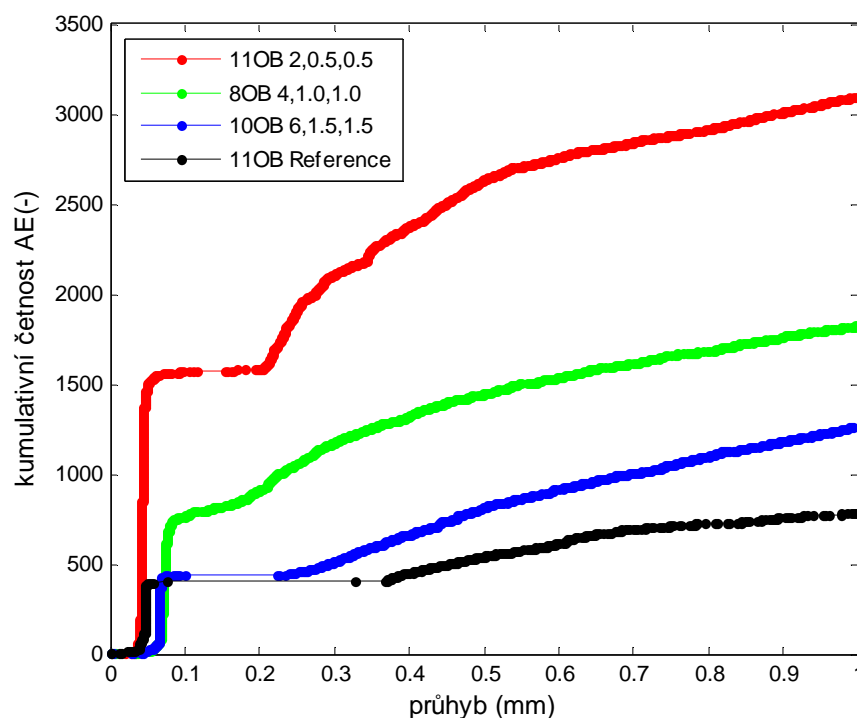
Obr. 4-30 Výsledky akustické emise na zkušebním tělese OB - 2,0/0,5/0,5



Obr. 4-31 Výsledky akustické emise na zkušebním tělese OB - 4,0/1,0/1,0



Obr. 4-32 Výsledky akustické emise na zkušebním tělese OB - 6,0/1,5/1,5



Obr. 4-33 Výsledky akustické emise na všech zkušebních sadách

V rámci diplomové práce byla metoda akustické emise aplikována na jednom trámci z každé sady zkušebních těles. Na obrázcích 4-29, 4-30, 4-31 a 4-32 jsou uvedeny grafy popisující průběh zatěžování a počet akustických signálů v závislosti na průhybu zkušebního tělesa. Na obrázku 4-33 je v grafu znázorněn kumulovaný počet akustických signálů zjištěných při provádění zkoušky.

U všech sledovaných těles došlo k největšímu počtu akustických signálů při poklesu působící síly, což vypovídá o největším porušení tělesa. Největší kumulativní počet akustických signálů byl naměřen na zkušebním tělese s obsahem vláken v poměru 2,0/0,5/0,5 kg, jak je patrné z obrázku 4-33. Naopak nejnižší počet akustických signálů byl zjištěn na zkušebním tělese z referenční směsi a na zkušebním tělese s množstvím vláken v poměru 6,0/1,5/1,5 kg. Z funkčního hlediska se nejlépe jeví trámec s vlákny v poměru 4,0/1,0/1,0 kg. U tohoto zkušebního tělesa vlákna přebírala tahová napětí plynule a trhliny se rozevíraly jen velice pozvolna.

4.7 Statický výpočet

V rámci diplomové práce byl v souladu s technickou normou ČSN EN 1992-1-1 vypracován statický výpočet fiktivního železobetonového průvlaku šířky 300 mm, výšky 400 mm. Délka průvlaku je 4 000 mm. Průvlak je navržen z betonu, jehož složení odpovídá složení betonu OB – R. Pro získání materiálových charakteristik byl beton zatříděn podle výsledků zkoušek do třídy C50/60. Pro výztuž byla použita ocel B 410 B.

Geometrie

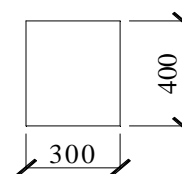
$$h = 400 \text{ mm}$$

$$b = 400 \text{ mm}$$

$$l = 4\,000 \text{ mm}$$

$$l_{eff} = l - a_1 - a_2 = 3\,875 \text{ mm}$$

$$a_1 = a_2 = \min\left\{\frac{h}{2}; \frac{t}{2}\right\} = \{200; 62,5\} = 62,5 \text{ mm}$$



Zatížení

Stálé

		$g_k [kNm^{-1}]$	γ_G	$g_d [kNm^{-1}]$
Trám	$0,3 \cdot 0,4 \cdot 25$	3,00	1,35	4,05
Omítka	$(2 \cdot 0,4 \cdot 0,02 + 0,3 \cdot 0,02) \cdot 20$	0,44	1,35	0,59
ŽB deska	$0,15 \cdot 20$	3,75	1,35	5,06
Podlaha		1,49	1,35	2,02
Celkem		8,68	1,35	11,72

Nahodilé

$$q_k = 2,0 \text{ kNm}^{-1}$$

$$q_d = q_k \cdot \gamma_Q = 2,0 \cdot 1,5 = 3,0 \text{ kNm}^{-1}$$

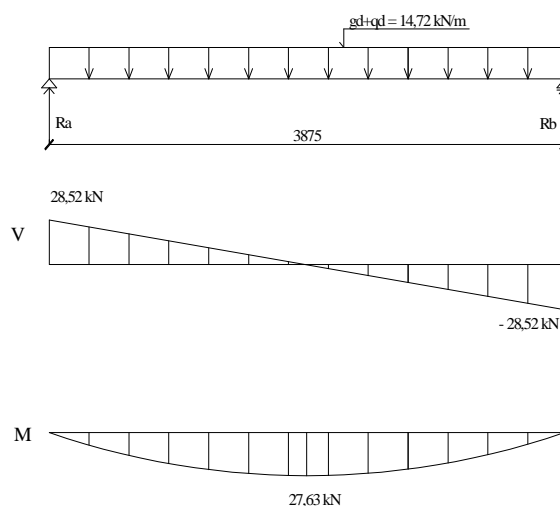
Účinky zatížení

$$R_a = R_b = \frac{1}{2} \cdot (q_d + g_d) \cdot l = 28,52 \text{ kN}$$

$$M_{q_k} = \frac{1}{8} \cdot q_k \cdot l^2 = 3,75 \text{ kNm}$$

$$M_{g_k} = \frac{1}{8} \cdot g_k \cdot l^2 = 16,29 \text{ kNm}$$

$$M_d = M_{q_k} \cdot \gamma_Q + M_{g_k} \cdot \gamma_G = 27,63 \text{ kNm}$$



Materiálové charakteristiky

Beton C50/60: $f_{ck} = 50 \text{ MPa}$

$f_{cd} = 33,3 \text{ MPa}$

$f_{ctm} = 2,1 \text{ MPa}$

$E_{cm} = 37 \text{ GPa}$

$\epsilon_{cu3} = 3,5 \text{ ‰}$

Ocel B 410 B: $f_{yk} = 410 \text{ MPa}$

$f_{tk} = 520 \text{ MPa}$

$f_{yd} = 274 \text{ MPa}$

$E_s = 210 \text{ GPa}$

$\epsilon_{yd} = f_{yd}/E = 1,3 \text{ ‰}$

4.7.1 Mezní stav únosnosti

Návrh výztuže

$$M_{Ed} = 27,63 \text{ kNm}$$

Krytí, předpoklad $\emptyset 16$

$$c_{nom} \leq c$$

$$c_{min} = \max \{ c_{min,dur} = 20; c_{min,b} = 16; 10 \}$$

$$c_{nom} = c_{min} + \Delta c_{def}$$

$$c_{nom} = 20 + 10 = 30 \text{ mm}$$

Plocha výztuže

$$d_1 = c_{nom} + \frac{\phi}{2} = 38 \text{ mm}$$

$$d = h - d_1 = 362 \text{ mm}$$

$$z = 0,85 \cdot d = 304 \text{ mm}$$

$$F_s = \frac{M_{Ed}}{z} = 91,04 \text{ kN}$$

$$A_{s,req} = \frac{F_s}{f_{yd}} = 332,3 \text{ mm}^2$$

Minimální vzdálenost prutů: max. $\{ 1,5\emptyset; 20; d_g+5 \} \rightarrow 24 \text{ mm}$

Návrh: **2 \emptyset V 16**; $A_{st} = 402,1 \text{ mm}^2$

Posudek

$$x = \frac{f_{yd} \cdot A_{st}}{b \cdot f_{cd} \cdot 0,8} = 13,8 \text{ mm}$$

$$z = d - \frac{0,8 \cdot x}{2} = 352 \text{ mm}$$

$$M_{Rd} = z \cdot F_s = 32,0 \text{ kNm}$$

$$M_{Rd} = 339,2 \text{ kNm} \geq M_{Ed} = 320,81 \text{ kNm} \dots \text{Vyhovuje}$$

$$\varepsilon_s = \frac{\varepsilon_{cu3} \cdot (d - x)}{x} = 87,0\text{‰}$$

$$\varepsilon_s = 87,0\text{‰} \geq \varepsilon_{yd} = 1,3\text{‰} \dots \text{Vyhovuje}$$

Konstrukční zásady

$$A_{st,min1} = 0,26 \cdot \frac{f_{ctm}}{f_{yk}} \cdot b \cdot d = 278,0 \text{ mm}^2$$

$$A_{st,min2} = 0,0013 \cdot b \cdot d = 139,2 \text{ mm}^2$$

$$A_{st,max} = 0,4 \cdot b \cdot d = 4284,0 \text{ mm}^2$$

$$A_{st,min} = 139,2 \text{ mm}^2 \leq A_{st} = 402,0 \text{ mm}^2 \leq A_{st,max} = 4284,0 \text{ mm}^2 \dots \text{Vyhovuje}$$

Návrh horní výztuže

$$A_{s,r} = 0,25 \cdot A_{st} = 100,5 \text{ mm}^2$$

$$\text{Návrh: } 2 \text{ Ø V } 10; A_{st} = 157,1 \text{ mm}^2$$

Posouzení na smyk

$$k = 1 + \sqrt{\frac{200}{d}} = 1,743 \text{ mm}$$

$$v_{min} = 0,035 \cdot k^{\frac{3}{2}} \cdot f_{ck}^{\frac{1}{2}} = 0,570$$

$$\min V_{Rdc} = v_{min} \cdot b \cdot d = 61,8 \text{ kN}$$

$$c_{Rd,c} = \frac{0,18}{\gamma_c} = 0,12$$

$$\rho_1 = \frac{A_{sl}}{b \cdot d} = 0,00375$$

$$k = 0,748$$

$$V_{Rd,cm} = c_{Rd,c} \cdot k \cdot (100 \cdot \rho_1 \cdot f_{ck})^{\frac{1}{3}} \cdot b_w \cdot d = 60,3 \text{ kN}$$

$$V_{Ed} = 28,52kN \geq V_{Rd,c} = 61,8kN$$

$V_{Ed} = 28,52kN \geq V_{Rd,cm} = 60,3kN$. . . *Vyhovuje* → návrh smykové výztuže podle konstrukčních zásad

$$\nu_1 = 0,6 \cdot \left[1 - \frac{f_{ck}}{250} \right] = 0,48$$

$$V_{Ed} = 28,52kN \leq 0,5 \cdot b \cdot d \cdot \nu_1 \cdot f_{cd} = 868kN \dots \textit{Vyhovuje}$$

Návrh smykové výztuže

Návrh: **2 Ø V 8**; $A_{sw} = 101 \text{ mm}^2$, $s = 250 \text{ mm}$

Posudek

$$s_{\max} = 0,75 \cdot d = 272 \text{ mm}$$

$$s = 250\text{mm} \leq s_{\max} = 272\text{mm} \dots \textit{Vyhovuje}$$

$$s = 250\text{mm} \leq 600\text{mm} \dots \textit{Vyhovuje}$$

$$\rho_{w,\min} = \frac{0,08 \cdot f_{ck}^{0,5}}{f_{yk}} = 0,00138$$

$$\rho_w = \frac{A_{sw}}{b \cdot s} = 0,00145$$

$$\rho_w = 0,00145\text{mm} \geq \rho_{w,\min} = 0,00138\text{mm} \dots \textit{Vyhovuje}$$

4.7.2 Mezní stav použitelnosti

Ohybový moment

Kvazistálá kombinace

$$M_{kqp} = M_g + M_q \cdot \psi_2 = 18,54 \text{ kNm}$$

$$\psi_2 = 0,6$$

Charakteristická kombinace

$$M_k = M_g + M_q = 20,04 \text{ kNm}$$

Průhyb po dokončení montáže ($t_0 = 28$ dní)

a) Ideální průřez bez trhlin

$$A_c = b \cdot h = 0,120 \text{ m}^2$$

$$A_{st} = 0,402 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2$$

$$\alpha_e = \frac{E_s}{E_{cm}} = 5,405$$

$$A_i = A_c + \alpha_e \cdot A_{st} = 122 \text{ } 173 \text{ mm}^2$$

$$S_i = A_c \cdot \frac{h}{2} + d \cdot \alpha_e \cdot A_{st} = 0,025 \text{ m}^3$$

$$x_i = \frac{S_i}{A_i} = 0,203 \text{ m}$$

$$I_i = \frac{1}{12} \cdot b \cdot h^3 + b \cdot h \cdot \left(\frac{h}{2} - x_i\right)^2 + \alpha_e \cdot A_{st} \cdot (d - x_i)^2 = 1,656 \cdot 10^{-3} \text{ m}^4$$

$$(EI)_I = E_{cm} \cdot I_i = 61 \text{ } 050 \text{ kNm}^2$$

Moment na mezi vzniku trhlin

$$M_{cr} = \frac{I_i}{h - x_i} \cdot f_{ctm} = 17,59 \text{ kNm}$$

$$M_k = 20,04 \text{ kNm} \geq M_{cr} = 17,59 \text{ kNm} \rightarrow \text{vznik trhlin}$$

b) Ideální průřez s trhlinami

$$x_{i,r} = -\frac{\alpha_e \cdot A_{st}}{b} + \sqrt{\left(\frac{\alpha_e \cdot A_{st}}{b}\right)^2 + 2 \cdot \frac{\alpha_e \cdot A_{st} \cdot d}{b}} = 0,0655 \text{ m}$$

$$I_{i,r} = \frac{1}{3} \cdot b \cdot x_{i,r}^3 + \alpha_e \cdot A_{st} \cdot (d - x_{i,r})^2 = 2,197 \cdot 10^{-4} \text{ m}^4$$

$$(EI)_{II} = E_{cm} \cdot I_{i,r} = 8103 \text{ kNm}^2$$

$\beta = 1,0$ – pro krátkodobé zatížení

$$\xi = 1 - \beta \cdot \left(\frac{M_{cr}}{M_{kqp}}\right)^2 = 0,1 \text{ kNm}^2$$

Průměrná ohybová tuhost

$$(EI)_m = \frac{1}{\frac{\xi}{(EI)_{II}} + \frac{1-\xi}{(EI)_I}} = 36\,923 \text{ kNm}^2$$

Průhyb konstrukce v okamžiku po dokončení montáže

$$f_{st} = \frac{5}{384} \cdot \frac{(g+q) \cdot l^4}{(EI)_m} = \mathbf{0,9 \text{ mm}}$$

$$f_{lim} = \frac{1}{500} \cdot l = 7,75 \text{ mm}$$

$$f_{st} = 0,9 \text{ mm} \leq f_{lim} = 7,75 \text{ mm} \dots \text{Vyhovuje}$$

Kritérium obecné použitelnosti – dotvarování ($t_0 = 28$ dní, ∞)

Součinitel dotvarování: $\varphi = 1,5$

a) Ideální průřez bez trhlin

$$A_c = b \cdot h = 0,120 \text{ m}^2$$

$$A_{st} = 0,402 \cdot 10^{-3} \text{ mm}^2$$

$$\alpha_{eff} = \frac{E_s}{E_{cm,eff}} = 14,19$$

$$E_{cm,eff} = \frac{E_{cm}}{1+\varphi} = 14,8 \text{ GPa}$$

$$A_i = A_c + \alpha_{eff} \cdot A_{st} = 0,126 \text{ m}^2$$

$$S_i = A_c \cdot \frac{h}{2} + d \cdot \alpha_{eff} \cdot A_{st} = 0,0261 \text{ m}^3$$

$$x_i = \frac{S_i}{A_i} = 0,207 \text{ m}$$

$$I_i = \frac{1}{12} \cdot b \cdot h^3 + b \cdot h \cdot \left(\frac{h}{2} - x_i\right)^2 + \alpha_{eff} \cdot A_{st} \cdot (d - x_i)^2 = 1,743 \cdot 10^{-3} \text{ m}^4$$

$$(EI)_I = E_{cm,eff} \cdot I_i = 25\,796 \text{ kNm}^2$$

Moment na mezi vzniku trhlin

$$M_{cr} = \frac{I_i}{h - x_i} \cdot f_{ctm} = 18,97 \text{ kNm}$$

$$M_k = 20,04 \text{ kNm} \geq M_{cr} = 18,97 \text{ kNm} \dots \rightarrow \text{vznik trhlin}$$

b) Ideální průřez s trhlinami

$$x_{i,r} = -\frac{\alpha_{eff} \cdot A_{st}}{b} + \sqrt{\left(\frac{\alpha_{eff} \cdot A_{st}}{b}\right)^2 + 2 \cdot \frac{\alpha_{eff} \cdot A_{st} \cdot d}{b}} = 0,0998 \text{ m}$$

$$I_{i,r} = \frac{1}{3} \cdot b \cdot x_{i,r}^3 + \alpha_{eff} \cdot A_{st} \cdot (d - x_{i,r})^2 = 4,916 \cdot 10^{-4} \text{ m}^4$$

$$(EI)_{II} = E_{cm,eff} \cdot I_{i,r} = 7\,276 \text{ kNm}^2$$

$\beta = 0,5$ – pro dlouhodobé zatížení

$$\xi = 1 - \beta \cdot \left(\frac{M_{cr}}{M_{kqp}}\right)^2 = 0,477$$

Průměrná ohybová tuhost

$$(EI)_m = \frac{1}{\frac{\xi}{(EI)_{II}} + \frac{1-\xi}{(EI)_I}} = 11\,651 \text{ kNm}^2$$

Průhyb konstrukce s vlivem dotvarování

$$f_{lt} = \frac{5}{384} \cdot \frac{(g+q) \cdot l^4}{(EI)_m} = 2,7 \text{ mm}$$

Kritérium obecné použitelnosti – smršťování ($t_0 = 7$ dní, ∞)

Součinitel smršťování: $\varphi = 1,7$

b) Ideální průřez bez trhlin

$$A_c = b \cdot h = 0,120 \text{ m}^2$$

$$A_{st} = 0,402 \cdot 10^{-3} \text{ mm}^2$$

$$\alpha_{eff} = \frac{E_s}{E_{cm,eff}} = 15,33$$

$$E_{cm,eff} = \frac{E_{cm}}{1 + \varphi} = 13,7 \text{ GPa}$$

$$A_i = A_c + \alpha_{eff} \cdot A_{st} = 0,126 \text{ m}^2$$

$$S_i = A_c \cdot \frac{h}{2} + d \cdot \alpha_{eff} \cdot A_{st} = 0,0262 \text{ m}^3$$

$$x_i = \frac{S_i}{A_i} = 0,208 \text{ m}$$

$$I_i = \frac{1}{12} \cdot b \cdot h^3 + b \cdot h \cdot \left(\frac{h}{2} - x_i\right)^2 + \alpha_{eff} \cdot A_{st} \cdot (d - x_i)^2 = 1,750 \cdot 10^{-3} \text{ m}^4$$

Statický modul průřezu výztuže k těžišti ideálního průřezu bez trhlin:

$$S_{ist} = A_{st} \cdot x_{st1} = 7,27 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3$$

$$x_{st1} = h - x_i - c - \frac{\phi}{2} = 0,181 \text{ m}$$

Moment na mezi vzniku trhlin:

$$M_{cr} = \frac{I_i}{h - x_i} \cdot f_{ctm} = 19,14 \text{ kNm}$$

$$M_k = 20,04 \text{ kNm} \geq M_{cr} = 19,14 \text{ kNm} \dots \rightarrow \text{vznik trhlin}$$

b) Ideální průřez s trhlinami

$$x_{i,r} = -\frac{\alpha_{eff} \cdot A_{st}}{b} + \sqrt{\left(\frac{\alpha_{eff} \cdot A_{st}}{b}\right)^2 + 2 \cdot \frac{\alpha_{eff} \cdot A_{st} \cdot d}{b}} = 0,1031 \text{ m}$$

$$I_{i,r} = \frac{1}{3} \cdot b \cdot x_{i,r}^3 + \alpha_{eff} \cdot A_{st} \cdot (d - x_{i,r})^2 = 5,230 \cdot 10^{-4} \text{ m}^4$$

Statický modul průřezu výztuže k těžišti ideálního průřezu s trhlinami

$$S_{irst} = A_{st} \cdot x_{st2} = 1,041 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3$$

$$x_{st2} = h - x_{i,r} - c - \frac{\phi}{2} = 0,259 \text{ m}$$

$\beta = 0,5$ – pro dlouhodobé zatížení

$$\xi = 1 - \beta \cdot \left(\frac{M_{cr}}{M_{kqp}} \right)^2 = 0,467 \text{ kNm}^2$$

Křivost:

$$\left(\frac{1}{r} \right)_{cs} = \varepsilon_{cs\infty} \cdot \alpha_{eff} \cdot \left[(1 - \xi) \cdot \frac{S_{ist}}{I_i} + \xi \cdot \frac{S_{irst}}{I_{i,r}} \right] = 0,618 \cdot 10^{-3} \text{ m}$$

Průhyb konstrukce od smrštění

$$f_{cs} = \frac{1}{8} \cdot \left(\frac{1}{r} \right)_{cs} \cdot l^2 = \mathbf{1,2 \text{ mm}}$$

Průhyb konstrukce s dotvarováním a od smrštění

$$f = f_{lt} + f_{cs} = \mathbf{3,9 \text{ mm}}$$

$$f_{lim} = \frac{1}{250} \cdot l = 15,5 \text{ mm}$$

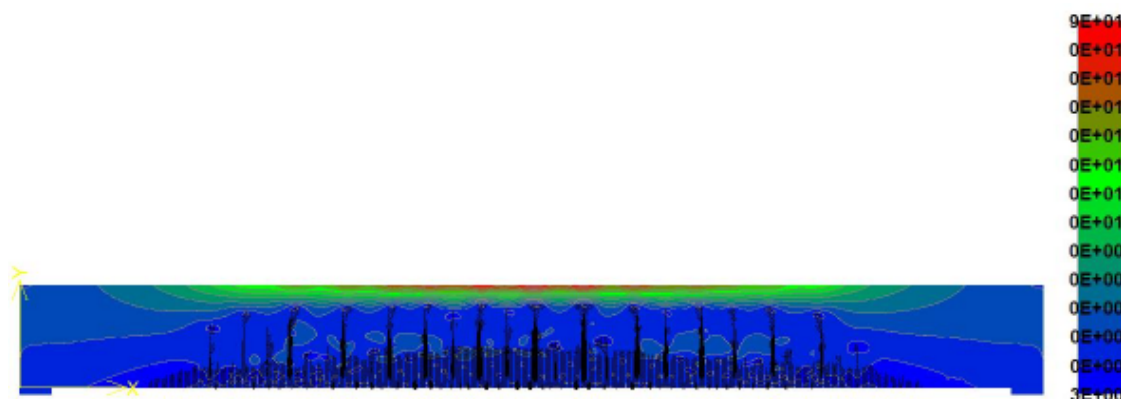
$$f = 3,9 \text{ mm} \leq f_{lim} = 15,5 \text{ mm} \dots \text{Vyhovuje}$$

4.8 Numerická analýza programem ATENA

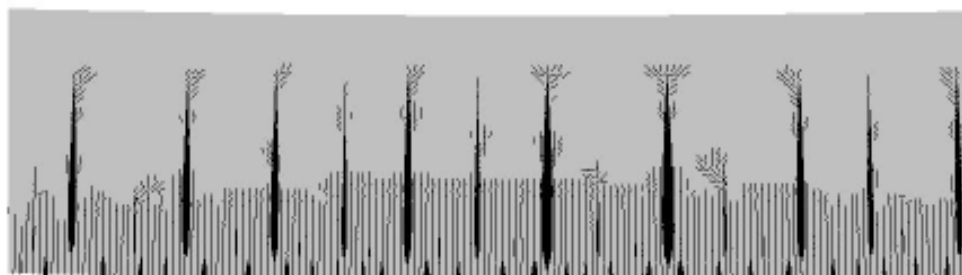
V rámci diplomové práce byly vymodelovány čtyři modely fiktivního železobetonového průvlaku ve výpočtovém programu ATENA. K modelování v programu ATENA se přikročilo z důvodu, že v něm lze simulovat chování vláknobetonu. Každý model byl definován jiným materiálem, stejnou betonářskou výztuží, a zatěžován stejným zatížením. Betonářská výztuž byla zadána podle návrhu z předchozí kapitoly 4.7 Statický výpočet.

První model simuloval chování fiktivního průvlaku z obyčejného betonu vyztuženého betonářskou výztuží, další modely odpovídaly fiktivním průvlakům z vláknobetonu s množstvím vláken v poměru 2,0/0,5/0,5 kg, 4,0/1,0/1,0 kg a 6,5/1,5/1,5 kg vyztuženým stejnou betonářskou výztuží. Pro specifikaci vláknobetonu ve výpočtovém programu ATENA byla stěžejní hodnota specifické lomové energie.

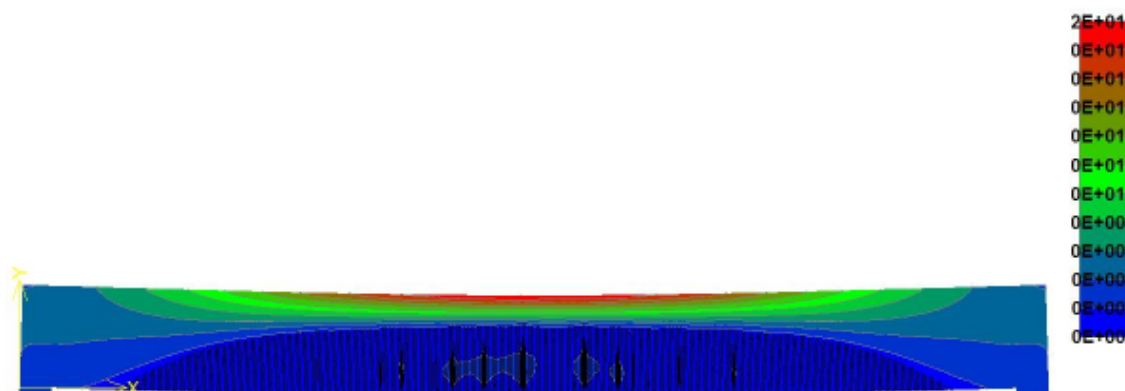
Výstupem jsou níže uvedené obrázky vystihující průběh napětí a množství trhlin v průvlaku z různých materiálů při normou dovoleném maximálním průhybu 15,5 mm.



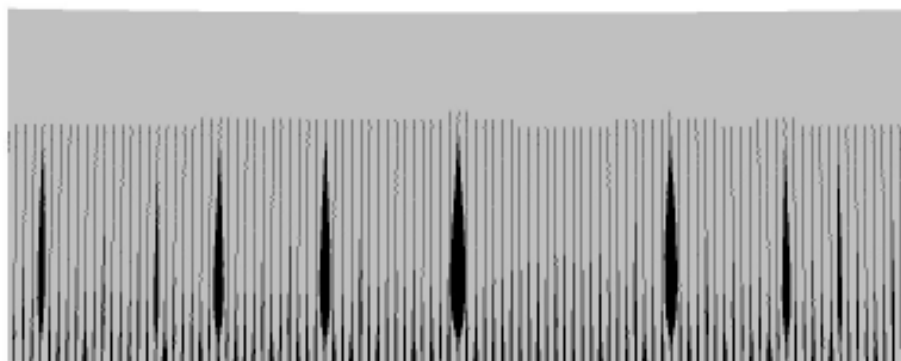
Obr. 4-34 Průběh napětí a trhlin v průvlaku bez vláken



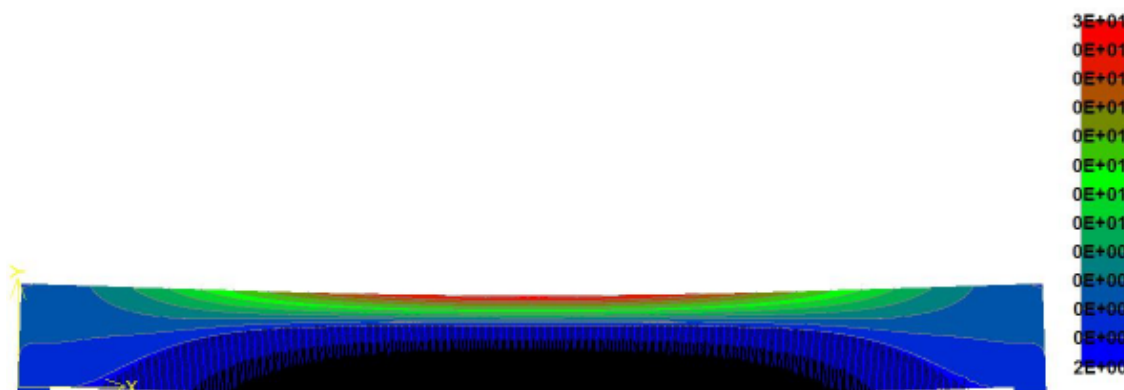
Obr. 4-35 Detail trhlin v průvlaku bez vláken



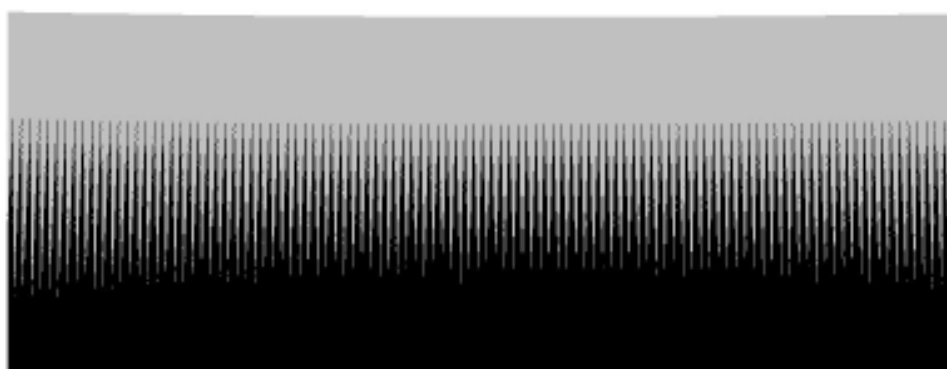
Obr. 4-36 Průběh napětí a trhlin v průvlaku s množstvím vláken v poměru 2,0/0,5/0,5 kg



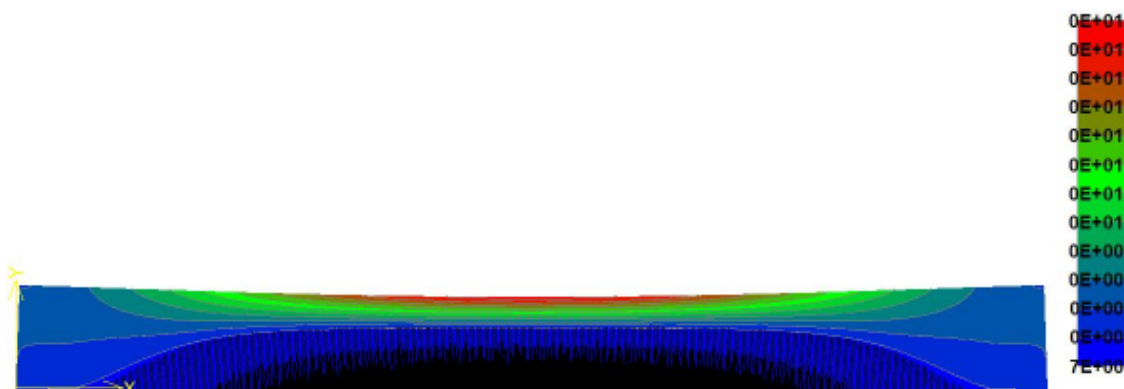
Obr. 4-37 Detail trhlin v průvlaku s množstvím vláken v poměru 2,0/0,5/0,5 kg



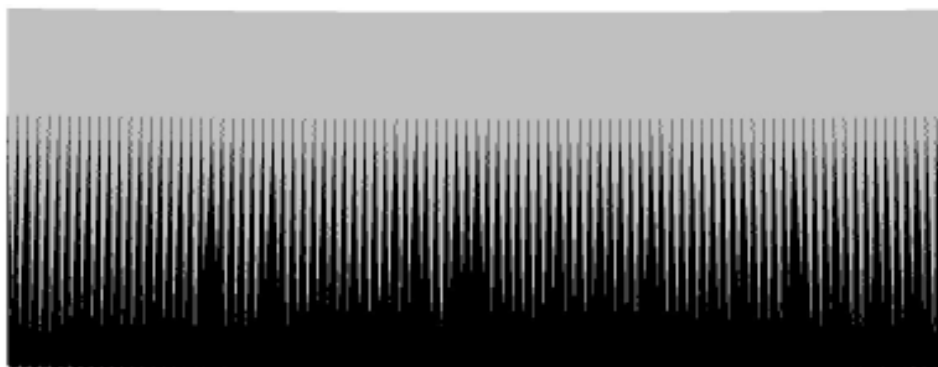
Obr. 4-38 Průběh napětí a trhlin v průvlaku s množstvím vláken v poměru 4,0/1,0/1,0 kg



Obr. 4-39 Detail trhlin v průvlaku s množstvím vláken v poměru 4,0/1,0/1,0 kg



Obr. 4-40 Průběh napětí a trhlin v průvlaku s množstvím vláken v poměru 6,0/1,5/1,5 kg



Obr. 4-41 Detail trhlin v průvlaku s množstvím vláken v poměru 6,0/1,5/1,5 kg

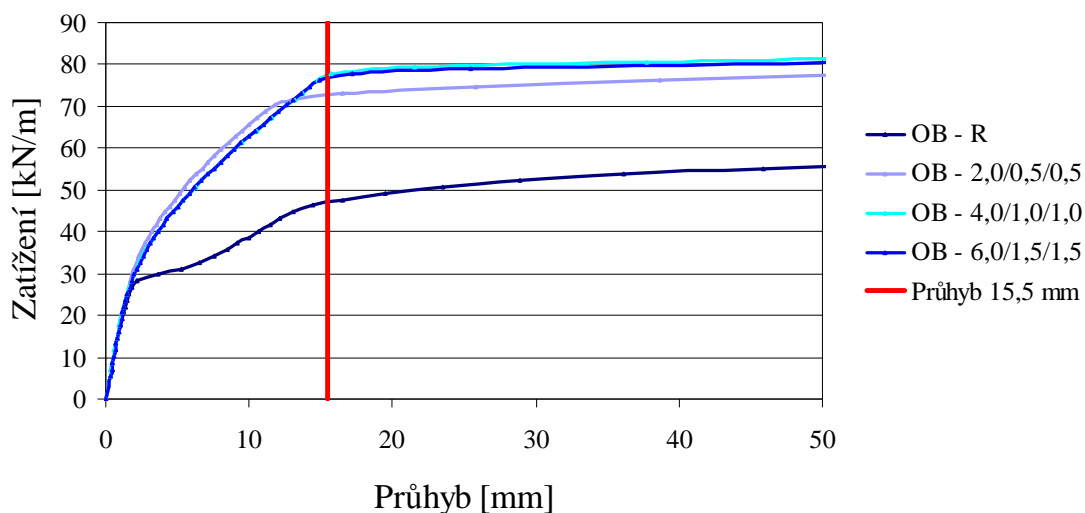
Simulované průvlaky z vláknobetonu dosahovaly maximální normou stanoveného průhybu při působení většího zatížení. Tomu odpovídají obrázky s průběhy napětí 4-22, 4-24, 4-26 a 4-28. Při vyhodnocení analýzy se věnovala pozornost velikosti a četnosti trhlin. Nejmenší počet trhlin byl pozorován u zkušebního tělesa bez vláken, jejich uspořádání však bylo nepravidelné, narozdíl od průvlaků s rozptýlenou výztuží. Šířka maximální trhliny jednotlivých fiktivních průvlaků je uvedena v tabulce 4-20.

Tab. 4-20 Šířka maximální trhliny

Označení	Maximální šířka trhliny [mm]
OB - R	0,450
OB - 2,0/0,5/0,5	0,141
OB - 4,0/1,0/1,0	0,031
OB - 6,0/1,5/1,5	0,039

Z výsledků uvedených v tabulce 4-20 vyplývá, že přidáním rozptýlené výztuže do betonu, se několikanásobně zmenší šířka maximální trhliny při maximálním normou povoleném průhybu 15,5 mm. Nejmenších trhlin dosáhla zkušební tělesa s množstvím rozptýlené výztuže v poměru 4,0/1,0/1,0 kg.

V grafu uvedeném na obrázku 4-42 lze pozorovat průběh deformace v závislosti na působícím zatížení všech fiktivních průvlaků podle výpočetního programu ATENA. V grafu je červenou čarou zvýrazněn maximální normou dovolený průhyb 15,5 mm.



Obr. 4-42 Průběh deformace v závislosti na zatížení

Z grafu vyplývá, že do průhybu 1,5 mm a zatížení 25 kN/m je závislost průhybu na zatížení u všech analyzovaných průvlaků lineární. Po dosažení těchto hodnot je chování průvlaku z referenční směsi odlišné od průvlaků s rozptýlenou výztuží. Z výsledků lze konstatovat, že přidání vláken do betonu vede ke snížení deformací při stejné zatížení.

5. Závěr

Cílem diplomové práce bylo vytvořit srovnání výsledků zkoušek cementových kompozitů se stejnou matricí a s přidáním polypropylenových vláken délek 19, 38 a 54 mm v hmotnostním poměru 2,0/0,5/0,5 kg, 4,0/1,0/1,0 kg a 6,0/1,5/1,5 kg na 1 m³ betonové směsi. Vyrobené kompozity bez přidanych vláken byly zařazeny do pevnostní třídy C 50/60. Pro každou zkoušku byla vyrobena minimálně tři zkušební tělesa pro každou kombinaci vláken a minimálně tři zkušební tělesa betonové směsi bez vláken. V důsledku většího množství přidané záměsové vody při první betonáži referenčních těles jsou mezi sebou porovnávány pouze vlastnosti vláknobetonů s kombinacemi vláken délek 54, 38 a 19 mm v poměru 2,0/0,5/0,5 kg, 4,0/1,0/1,0 kg a 6,0/1,5/1,5 kg.

Stejnorodost

Všechny zkušební sady splnily podmínky stejnorodosti uvedené v normě ČSN 732011 a jsou stejnorodé.

Objemová hmotnost

Nejvyšší hodnoty dosáhl beton OB - 2,0/0,5/0,5, následoval beton OB - 4,0/1,0/1,0 s hodnotou nižší o 1,1 % a nejnižší hodnoty dosáhl beton OB - 6,0/1,5/1,5 s hodnotou nižší o 2,5 %. Rozdíly v objemových hmotnostech byly zanedbatelné a mohly být způsobeny nepřesnostmi při měření či výrobě.

Informativní pevnost v tlaku

Výsledky informativní pevnosti v tlaku byly výrazně nižší než skutečné naměřené hodnoty. Tento fakt je způsoben tím, že vzorce pro určování informativní pevnosti byly vytvořeny před třiceti lety a neodpovídají dnešním betonům.

Pevnost v tlaku

Nejvyšší pevnost byla zjištěna u betonu OB - 2,0/0,5/0,5, nižší hodnota byla naměřena na betonu OB - 6,0/1,5/1,5, která byla o 12,2 % nižší a nejnižší hodnota byla naměřena na betonu OB - 4,0/1,0/1,0, jejíž hodnota se od nejvyšší pevnosti lišila o 17,7 %.

Pevnost v příčném tahu

Množství rozptýlené výztuže jen nepatrně snižovalo pevnost v příčném tahu. Od nejvyšší hodnoty betonu OB - 2,0/0,5/0,5 se pevnost v příčném tahu snížila o 2,2 % pro beton OB - 4,0/1,0/1,0 a o 5,6% pro beton OB - 6,0/1,5/1,5.

Statický modul pružnosti v tlaku

Rozdíly statického modulu pružnosti v tlaku nebyly příliš velké. Nejvyšší statický modul pružnosti byl naměřen na zkušební sadě OB - 4,0/1,0/1,0. Na zkušebních tělesech OB - 2,0/0,5/0,5 byla naměřena hodnota nižší o 3,0 %, na zkušebních tělesech OB - 6,0/1,5/1,5 byla hodnota nižší o 7,8%.

Modul pružnosti v tahu ohybem

Nejvyšší hodnota modulu pružnosti v tahu ohybem byla dosažena u zkušebních těles sady OB - 2,0/0,5/0,5. U zkušebních těles OB - 6,0/1,5/1,5 byla naměřena hodnota nižší o 5,3 %, u zkušebních těles OB - 4,0/1,0/1,0 pak o 11,1 %.

Modul přetvárnosti v tahu ohybem

Modul přetvárnosti v tahu ohybem byl naměřen shodný pro beton OB - 2,0/0,5/0,5 a OB - 6,0/1,5/1,5. Pro beton OB - 4,0/1,0/1,0 byla naměřená hodnota nižší o 9,4 %.

Dynamický modul pružnosti v tlaku a tahu

Dynamický modul pružnosti v tlaku a tahu byl zjišťován na zkušebních tělesech třemi způsoby – UZ impulzovou metodou, rezonanční metodou z frekvencí podélného kmitání a rezonanční metodou příčného kmitání.

- Při měření UZ impulzovou metodou se hodnota modulu pružnosti v tlaku a tahu snižovala v závislosti na množství vláken. Nejvyšší hodnota byla naměřena na vzorcích OB - 2,0/0,5/0,5, na zkušebních vzorcích OB - 4,0/1,0/1,0 a OB - 6,0/1,5/1,5 byla hodnota o 6,1 % a 9,1 % nižší.

- Hodnoty dynamického modulu pružnosti v tlaku a tahu stanovené rezonanční metodou z podélného kmitání se poměrně výrazně lišily v závislosti na množství přidávaných vláken. Nejvyšší hodnota byla naměřena u betonu OB - 6,0/1,5/1,5, následoval beton OB - 4,0/1,0/1,0 s hodnotou nižší o 17,4 % a nejnižší hodnota byla zjištěna na betonu OB - 6,0/1,5/1,5, která se od nejvyšší hodnoty lišila o 21,1 %.
- Při měření rezonanční metodou z příčného kmitání byl zjištěn podobný trend. Nejvyšší hodnoty dosáhla zkušební sada OB - 2,0/0,5/0,5, následovala zkušební sada OB - 4,0/1,0/1,0 s hodnotou o 8,0 % nižší a nejnižší hodnotu dosáhla sada zkušebních těles OB - 6,0/1,5/1,5 s hodnotou lišící se o 13,4 %.

Dynamický modul pružnosti ve smyku

Množství rozptýlené výztuže je nepřímě úměrné hodnotě dynamického modulu pružnosti ve smyku. Nejvyšší hodnota byla dosažena u betonů OB - 2,0/0,5/0,5, nižší hodnota o 8,9 % byla naměřena na betonech OB - 4,0/1,0/1,0 a nejnižších hodnot dosáhl beton OB - 6,0/1,5/1,5, jehož hodnota se lišila o 14,7 % od nejvyšší naměřené hodnoty.

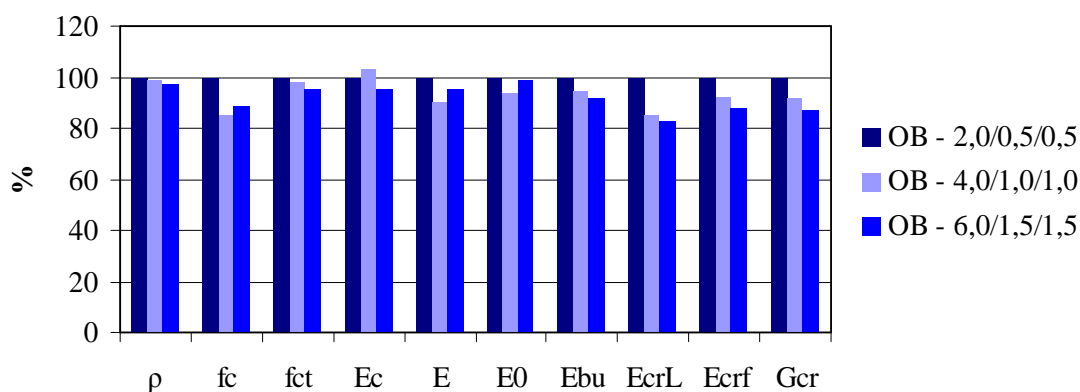
Lomové parametry

Při stanovení byly sledovány čtyři parametry – Statický modul pružnosti, efektivní lomová houževnatost, specifická lomová energie a specifická lomová práce.

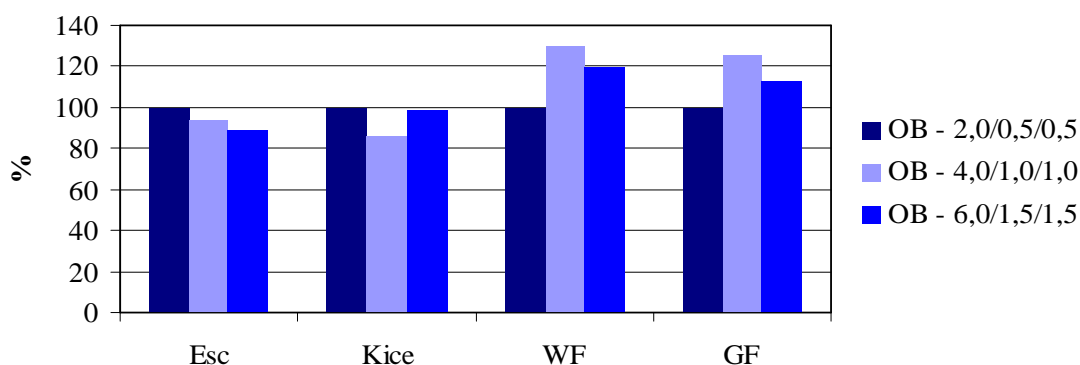
- Nejvyšší hodnota statického modulu pružnosti byla zjištěna na zkušebních tělesech OB - 2,0/0,5/0,5, o 6,7 % byla hodnota nižší u těles OB - 4,0/1,0/1,0. Nejnižší hodnota byla naměřena na zkušební sadě vzorků OB - 6,0/1,5/1,5, která se lišila o 12,0 % od nejvyšší naměřené hodnoty.
- Při stanovení hodnoty efektivní lomové houževnatosti bylo zjištěno, že nejvyšší hodnoty dosáhly zkušební sady OB - 2,0/0,5/0,5 a OB - 6,0/1,5/1,5. Poslední sada OB - 4,0/1,0/1,0 dosáhla hodnoty efektivní lomové houževnatosti o 16,5 % nižší.

- Nejvyšší hodnota specifické lomové práce byla zjištěna na zkušebních tělesech OB - 4,0/1,0/1,0, následovala zkušební tělesa OB - 6,0/1,5/1,5 s hodnotou o 8,3 % nižší. Nejnižší hodnota byla naměřena na tělesech OB - 2,0/0,5/0,5, která se lišila o 29,8 % od nejvyšší hodnoty.
- Podobné rozdíly mezi hodnotami bylo zjištěno také u specifické lomové práce. Nejvyšší hodnota byla naměřena rovněž u betonu OB - 4,0/1,0/1,0. Zkušební sady OB - 6,0/1,5/1,5 a OB - 2,0/0,5/0,5 dosáhly hodnoty specifické lomové práce o 11,4 % a 25,2 % nižší.

V grafu na obrázcích 5-1 a 5-2 jsou pro srovnání uvedeny výsledky všech měření.



Obr. 5-1 Výsledky fyzikálně mechanických vlastností



Obr. 5-2 Výsledky lomové zkoušky

Provedené zkoušky měly prokázat, jaký vliv mají různé kombinace polypropylenových vláken na vlastnosti cementových kompozitů. Z uvedených výsledků lze vyčíst, že

nejlepších výsledků dosáhla ve většině provedených zkoušek kombinace vláken rozptýlené výztuže v poměru 2,0/0,5/0,5 kg.

Akustická emise

Nejvyšší počet akustických signálů byl zaznamenán u zkušebního tělesa s množstvím rozptýlené výztuže v poměru 2,0/0,5/0,5 kg. Následovalo těleso s množstvím vláken 4,0/1,0/1,0 kg a 6,0/1,5/1,5 kg. Nejmenší počet akustických signálů byl zjištěn u zkušebního trámce z betonu bez vláken. Z funkčního hlediska je nejvýhodnější kombinace vláken v poměru 4,0/1,0/1,0 kg - vlákna přebírala tahové účinky plynule po celou dobu zatěžování a trhлина se rozšiřovala jen pozvolna.

Statický výpočet

Fiktivní železobetonový průvlak byl navržen v souladu s normou ČSN EN 1992 – 1 – 1 a vyhověl všem podmínkám mezního stavu únosnosti a použitelnosti.

Numerická analýza programem ATENA

Numerická analýza měla prokázat, jaký vliv na deformaci fiktivního průvlaku má množství rozptýlené výztuže. Z výsledků výpočetního programu lze tvrdit, že množství ani kombinace vláken nemá takový vliv jako samotná přítomnost rozptýlené výztuže v betonu, kdy bylo působící zatížení při stejném průhybu téměř dvojnásobné.

Ačkoli mohou vlákna výrazně ovlivnit vlastnosti výsledného materiálu, přistupuje se k jejich aplikaci v konstrukci poměrně zřídka. Hlavním důvodem, proč se rozptýlená výztuž v České republice nepoužívá v takové míře jako ve světě, je vysoká cena a neznalost tohoto materiálu.

Vzhledem k tomu, že cena vláken neustále klesá s rozšiřujícím se sortimentem, můžeme očekávat, že zastoupení vláknobetonu v konstrukcích bude nabývat na významu.

6. Seznam použité literatury

- [1] BENTUR, Arnon; MINDESS, Sidney. *Fibre reinforced cementitious composites*. London: Spon press Taylor & Francis Group, 1990. 451 s. ISBN 1-85166-393-2.
- [2] KOLÍSKO, Jiří. *Vliv krátkých všesměrně rozptýlených polypropylénových mikro a makrovláken na vlastnosti cementových malt a betonů*. Praha: ČVUT v Praze, 2008. 24 s. ISBN 978-80-01-04072-0.
- [3] PYTLÍK, Petr. *Technologie betonu*. Brno: VUT v Brně, 1997, 400 s. ISBN 80–214–2909–7.
- [4] KUCHARCZYKOVÁ, Barbara. *Analýza vlivu vlastností lehkého konstrukčního betonu z pórovitého kameniva na jeho využití v nosných betonových konstrukcích: disertační práce*. Brno, 2008. 116 s. VUT Brno. Fakulta stavební. Ústav stavebního zkušebnictví. Vedoucí disertační práce prof. Ing. Jiří Adámek, CSc.
- [5] KERŠNER, Zbyněk, PUKL a Drahomír NOVÁK. *Vybrané stati z nosných konstrukcí budov: Nelineární lomová mechanika pro modelování prvků a konstrukcí z kvazikřehkých materiálů*. Brno: VUT v Brně, 2006, 64 s.
- [6] CIKRLE, Petr, Ondřej ANTON, Petr DANĚK, Barbara KUCHARCZYKOVÁ a Petr MISÁK. *NDT zkoušení ve stavebnictví: Příručka ČŽV*. Brno: VUT v Brně, 2010, 95 s. ISBN 978-80-214-4198-9.
- [7] ČESKOMORAVSKÝ BETON, ČESKOMORAVSKÝ CEMENT, ČESKOMORAVSKÉ ŠTĚRKOVNY. *Beton: Příručka technologa*. 2. vyd. Artis, 2005, 208 s.
- [8] ČESKÁ KOMORA AUTORIZOVANÝCH INŽENÝRŮ A TECHNIKŮ ČINNÝCH VE VÝSTAVBĚ. *Druhy a složení cementů podle ČSN EN 197-1*. 1. vyd. Praha: Grand, 2010.

-
- [9] HELA, Rudolf. *Studijní opora pro komb. st. - Modul BJ04 – M01 Technologie betonu I*. Brno, 2005. 110 s. Elektronická opora.
- [10] *Beton TKS*. Č. 2/2010. Praha 5: Libertas a. s., 2010. Vychází dvouměsíční. ISSN 1213-3116
- [11] TP FC 1-1. *Zkoušení vláknobetonu – Vyhodnocení destruktivních zkoušek a stanovení charakteristického pracovního diagramu vláknobetonu pro navrhování vláknobetonových konstrukcí*. Praha: Českomoravský beton, a. s., 2007. 34 s.
- [12] BALVÍN, Petr. Negativní účinky azbestu v rámci navrhování staveb, současný stav. *Časopis stavebnictví* [online]. 2008, 04/08, [cit. 13.3.2011]. Dostupný z: <http://www.casopisstavebnictvi.cz/clanek.php?detail=735>
- [13] ČERVENKA, Jan a Václav VESELÝ. ČERVENKA CONSULTING. *Dokumentace programu ATENA: Průvodce programem ATENA 2D*. Praha, 2005, 52 s. Dostupné z: http://www.cervenka.cz/assets/files/atena-pdf/ATENA-Engineering-2D_Pr%C5%AFvodce.pdf
- [14] BEČVÁŘ, Petr a Martin CVRČEK. Znalostní přístupy v diagnostických systémech akustické emise. *Automa* [online]. 2001, č. 12 [cit. 2012-12-29]. Dostupné z: http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id_document=33761
- [15] ČSN EN 12350 - 6. *Zkouška čerstvého betonu – Část 6: Objemová hmotnost*. Praha: Český normalizační institut, 2009, 12 s.
- [16] ČSN EN 12350 – 5. *Zkouška čerstvého betonu – Část 5: Zkouška rozlitím*. Praha: Český normalizační institut, 2009, 12 s.
- [17] ČSN EN 12390 – 2. *Zkoušení ztvrdlého betonu – Část 2: Výroba a ošetřování zkušebních těles pro zkoušení pevnosti*. Praha: Český normalizační institut, 2009, 20 s.

- [18] ČSN 732011. *Nedestruktivní zkoušení betonových konstrukcí*. Praha: Český normalizační institut, 2012, 24 s.
- [19] ČSN EN 12390 – 7. *Zkoušení ztvrdlého betonu - Část 7: Objemová hmotnost ztvrdlého betonu*. Praha: Český normalizační institut, 2009, 12 s.
- [20] ČSN EN 12390 – 3. *Zkoušení ztvrdlého betonu – Část 3: Pevnost v tlaku zkušebních těles*. Praha: Český normalizační institut, 2009, 20 s.
- [22] ČSN ISO 6784. *Stanovení statického modulu pružnosti v tlaku*. Praha: Český normalizační institut, 1993, 8 s.
- [23] ČSN 736174. *Stanovení modulu pružnosti a přetvárnosti betonu ze zkoušky v tahu ohybem*. Praha: Český normalizační institut, 1994, 8 s.
- [24] ČSN EN 12390 – 6. *Zkoušení ztvrdlého betonu – Část 6: Pevnost v příčném tahu zkušebních těles*. Praha: Český normalizační institut, 2010, 12 s.
- [25] Pedagogická fakulta Masarykovy univerzity: Akustická emise. [online]. [cit. 2012-12-29]. Dostupné z: <http://www.ped.muni.cz/wphy/projekty/KEMIS.HTML>
- [26] Beton. *Wikipedie* [online]. 2012 [cit. 2012-12-29]. Dostupné z: <http://cs.wikipedia.org/wiki/Beton>
- [27] Příměsi. *ZAPA beton* [online]. 2009 [cit. 2012-12-29]. Dostupné z: <http://www.zapa.cz/vyroba-a-doprava/beton-slozeni-a-vlastnosti/primesi>
- [28] Polypropylenová vlákna. *Technický a skúšobný ústav stavebný* [online]. 2010 [cit. 2012-9-29]. Dostupné z: <http://www.tsus.sk/profil/publikcinnost/briatka-1.pdf>
- [29] Umělé kamenivo. *EBeton: Specialista na beton* [online]. [cit. 2012-11-22]. Dostupné z: <http://www.ebeton.cz/pojmy/umele-kamenivo>

- [30] Vlákná Forta - produkty. *EMZet* [online]. [cit. 2012-11-22]. Dostupné z: <http://www.emzet.cz/vlakna-forta/vlakna-forta.htm>
- [31] BeneSteel 55. *Sklocement Beneš* [online]. [cit. 2012-10-26]. Dostupné z: <http://www.sklocement.cz/benestcz.htm>
- [32] Fibrex: polypropylénová vlákna do malt, omítek a betonů. *Premix* [online]. [cit. 2012-12-10]. Dostupné z: <http://www.premix.cz/produkty/fibrrex.html>
- [33] Polypropylenová stříž: STAVON. *Trevos Košťálov* [online]. [cit. 2012-12-10]. Dostupné z: http://www.trevos-kostalov.cz/php_cz/pop_sta.php
- [34] Fibrin: Syntetické fibrilované vlákno. *Chryso* [online]. [cit. 2012-12-10]. Dostupné z: http://www.chryso.cz/upload/t_documents/Fichier_L1/49111/Chfibrin_1950D.pdf
- [35] Červenka consulting: ATENA. [online]. [cit. 2013-01-08]. Dostupné z: <http://www.cervenka.cz/cz/produkty/atenacs>
- [36] Drátkobeton Steelcrete pro lepší stavění. *TZB - info* [online]. 2012 [cit. 2012-12-29]. Dostupné z: <http://stavba.tzb-info.cz/hruba-stavba/9010-dratkobeton-steelcrete-pro-lepsi-staveni>
- [37] Fibre Reinforced Concrete. *The constructor* [online]. 2012 [cit. 2012-12-29]. Dostupné z: <http://theconstructor.org/concrete/fibre-reinforced-concrete/150/>
- [38] Steel fiber manufactory. *GXW* [online]. [cit. 2012-12-29]. Dostupné z: <http://www.shgxw.com/00100005/php/picshow.php?menuid=7&getproductlistid=4030&lang=3>
- [39] Fracture Characteristics: Three-Point Bending. *Sticrack: Fracture Toughness* [online]. 2002-2003 [cit. 2012-11-13]. Dostupné z: <http://ashtray.jz.gts.cz/~smsti/StiCrack.php?type=3PB>



- [40] Elektro Šudoma: Prodej Kačírku. [online]. [cit. 2013-01-08]. Dostupné z: <http://www.elektrosudoma.cz/produkty/prodej-kamenivo-kacirek.html>
- [41] FABP: Nabídka prodeje hájek. [online]. [cit. 2013-01-08]. Dostupné z: <http://www.elektrosudoma.cz/produkty/prodej-kamenivo-kacirek.html>

7. Seznam obrázků

Obr. 3-1 Ukázka těženého a drceného kameniva [40], [41].....	12
Obr. 3-2 Polypropylénová a ocelová vlákna [37], [38].....	16
Obr. 3-3 Čerstvý beton s ocelovými vlákny [36].....	22
Obr. 3-4 Shluky vláken při nesprávném mísení s betonovou směsí, tzv. ježci [10].....	25
Obr. 3-5 Místa měření UZ impulzové metody[6].....	30
Obr. 3-6 Umístění snímače pro měření f_L , f_f a f_t [6].....	31
Obr. 4-1 Výroba vláknobetonu – mísení polypropylénových vláken s kamenivem.....	33
Obr. 4-2 Objemová hmotnost ztvrdlého betonu.....	37
Obr. 4-3 Vyhovující porušení při tlakové zkoušce [20].....	39
Obr. 4-4 Pevnost v tlaku.....	40
Obr. 4-5 Umístění zkušebního tělesa, porušení zkušebního tělesa.....	41
Obr. 4-6 Pevnost betonu v příčném tahu	42
Obr. 4-7 Umístění zkušebního tělesa do lisu.....	43
Obr. 4-8 Statický modul pružnosti v tlaku.....	44
Obr. 4-9 Osazení zkušebního tělesa do lisu při měření modulu pružnosti a přetvárnosti v ohybu.....	45
Obr. 4-10 Modul pružnosti v tahu ohybem.....	46
Obr. 4-11 Modul přetvárnosti v tahu ohybem.....	47
Obr. 4-12 Měření vlastní frekvence krouživého kmitání f_t	48
Obr. 4-13 Dynamický modul pružnosti v tahu a tlaku E_{bu} stanovený UZ impulzovou metodou.....	50
Obr. 4-14 Dynamický modul pružnosti v tahu a tlaku E_{crL} stanovený rezonanční metodou.....	51
Obr. 4-15 Dynamický modul pružnosti v tahu a tlaku E_{crf} stanovený rezonanční metodou.....	52
Obr. 4-16 Dynamický modul pružnosti ve smyku G_{cr}	53
Obr. 4-17 Zkouška tříbodovým ohybem.....	54
Obr. 4-18 Schéma zatěžování těles při zjišťování lomových parametrů [4].....	55
Obr. 4-19 Zatěžovací diagram zkušebních těles bez vláken.....	56

Obr. 4-20 Zatěžovací diagram zkušebních těles s vlákny v poměru 2,0/1,0/1,0 kg.....	56
Obr. 4-21 Zatěžovací diagram zkušebních těles s vlákny v poměru 4,0/1,0/1,0 kg.....	57
Obr. 4-22 Zatěžovací diagram zkušebních těles s obsahem vláken 6,0/1,5/1,5 kg.....	57
Obr. 4-23 Graf bez úprav, proložení grafu přímkou, výsledný graf s nahrazenými nelineárními hodnotami.....	58
Obr. 4-24 Lomové parametry – statický modul pružnosti určený programem StiCrack E_{SC}	59
Obr. 4-25 Lomové parametry – Efektivní lomová houževnatost K_{Ic}	60
Obr. 4-26 Lomové parametry – Specifická lomová práce W_F	61
Obr. 4-27 Lomové parametry – specifická lomová energie G_F	62
Obr. 4-28 Měření akustické emise.....	63
Obr. 4-29 Výsledky akustické emise na zkušebním tělese OB - R.....	64
Obr. 4-30 Výsledky akustické emise na zkušebním tělese OB - 2,0/0,5/0,5.....	64
Obr. 4-31 Výsledky akustické emise na zkušebním tělese OB - 4,0/1,0/1,0.....	65
Obr. 4-32 Výsledky akustické emise na zkušebním tělese OB - 6,0/1,5/1,5.....	65
Obr. 4-33 Výsledky akustické emise na všech zkušebních sadách.....	66
Obr. 4-34 Průběh napětí a trhlin v průvlaku bez vláken	77
Obr. 4-35 Detail trhlin v průvlaku bez vláken.....	78
Obr. 4-36 Průběh napětí a trhlin v průvlaku s množstvím vláken 2,0/0,5/0,5 kg	78
Obr. 4-37 Detail trhlin v průvlaku s množstvím vláken v poměru 2,0/0,5/0,5 kg.....	78
Obr. 4-38 Průběh napětí a trhlin v průvlaku s množstvím vláken 4,0/1,0/1,0 kg.....	79
Obr. 4-39 Detail trhlin v průvlaku s množstvím vláken v poměru 4,0/1,0/1,0 kg.....	79
Obr. 4-40 Průběh napětí a trhlin v průvlaku s množstvím vláken 6,0/1,5/1,5 kg.....	79
Obr. 4-41 Detail trhlin v průvlaku s množstvím vláken v poměru 6,0/1,5/1,5 kg.....	80
Obr. 4-42 Průběh deformace v závislosti na zatížení.....	81
Obr. 5-1 Výsledky fyzikálně mechanických vlastností.....	85
Obr. 5-2 Výsledky lomové zkoušky.....	85

8. Seznam tabulek

Tab. 3-1 Pevnostní třídy betonu a jejich charakteristiky.....	11
Tab. 3-2 Fyzikální a mechanické vlastnosti vláken [1].....	17
Tab. 3-3 Pevnostní třídy vláknobetonu v tlaku stanovené zk. válcové pevnosti [11]....	26
Tab. 3-4 Pevnostní třídy vláknobetonu v tlaku stanovené zk. krychelné pevnosti [11]..	27
Tab. 3-5 Pevnostní třídy vláknobetonu v tahu na mezi vzniku makrotrhlin [11].....	27
Tab. 3-6 Pevnostní třídy vláknobetonu v reziduálním tahu po vzniku makrotrhlin [11].....	28
Tab. 4-1 Složení betonů.....	34
Tab. 4-2 Objemová hmotnost.....	34
Tab. 4-3 Zkouška rozlitím.....	35
Tab. 4-4 Stejnorodost betonu podle ČSN EN 732011.....	36
Tab. 4-5 Objemová hmotnost ztvrdlého betonu.....	37
Tab. 4-6 Informativní pevnost betonu v tlaku stanovená na krychlích a na kvádrech...	38
Tab. 4-7 Pevnost v tlaku.....	40
Tab. 4-8 Pevnost v příčném tahu.....	42
Tab. 4-9 Statický modul pružnosti v tlaku.....	43
Tab. 4-10 Modul pružnosti v tahu ohybem.....	46
Tab. 4-11 Modul přetvárnosti v tahu ohybem.....	47
Tab. 4-12 Dynamický modul pružnosti v tahu a tlaku E_{bu} stanovený UZ impulzovou metodou.....	50
Tab. 4-13 Dynamický modul pružnosti v tahu a tlaku E_{crL} stanovený rezonanční metodou.....	51
Tab. 4-14 Dynamický modul pružnosti v tahu a tlaku E_{crf} stanovený rezonanční metodou.....	52
Tab. 4-15 Dynamický modul pružnosti ve smyku G_{cr}	53
Tab. 4-16 Lomové parametry – statistický modul pružnosti určený programem StiCrack E_{SC}	59
Tab. 4-17 Lomové parametry – Efektivní lomová houževnatost K_{Ice}	60
Tab. 4-18 Lomové parametry – Specifická lomová práce W_F	60

Tab. 4-19 Lomové parametry – Specifická lomová energie G_F	61
Tab. 4-20 Šířka maximální trhliny.....	80
Tab. 5-1 Pevnost v tlaku.....	97
Tab. 5-2 Pevnost v příčném tahu.....	98
Tab. 5-3 Statický modul pružnosti v tlaku.....	99
Tab. 5-4 Modul pružnosti a přetvárnosti v ohybu.....	100
Tab. 5-5 Hodnoty naměřené na krychlích.....	101
Tab. 5-6 Hodnoty naměřené na trámcích.....	102
Tab. 5-7 Lomové parametry.....	104



9. Seznam příloh

- P1 Vstupní hodnoty: Objemová hmotnost, pevnost v tlaku a pevnost v příčném tahu
- P2 Vstupní hodnoty: Statický modul pružnosti v tlaku, modul pružnosti a přetvárnosti v ohybu
- P3 Vstupní hodnoty: Dynamický modul pružnosti v tlaku a tahu, dynamický modul pružnosti ve smyku
- P4 Vstupní hodnoty: Lomové parametry, akustická emise

P1

Vstupní hodnoty: Objemová hmotnost, pevnost v tlaku a pevnost v příčném tahu

Tab. 5-1 Pevnost v tlaku

OB - R					
	a [mm]	b [mm]	c [mm]	F [kN]	m [kg]
3OB	149,71	149,95	147,52	1440,7	7,655
4OB	150,05	149,89	149,29	1459,6	7,771
4OB	150,02	149,90	148,97	1451,1	7,746

OB - 2,0/0,5/0,5					
	a [mm]	b [mm]	c [mm]	F [kN]	m [kg]
3OB	149,91	150,06	146,48	1881,8	7,625
4OB	149,86	149,90	148,31	1849,9	7,705
5OB	149,90	150,02	147,22	1869,3	7,678

OB - 4,0/1,0/1,0					
	a [mm]	b [mm]	c [mm]	F [kN]	m [kg]
3OB	149,91	151,14	150,64	1615,6	7,739
4OB	149,87	149,88	148,66	1558,1	7,676
5OB	149,89	150,05	149,90	1604,5	7,705

OB - 6,0/1,5/1,5					
	a [mm]	b [mm]	c [mm]	F [kN]	m [kg]
3OB	149,86	149,99	147,01	1578,5	7,519
4OB	150,00	149,96	150,37	1716,0	7,707
5OB	150,01	149,83	149,89	1689,4	7,677

Tab. 5-2 Pevnost v příčném tahu

OB - R					
	a [mm]	b [mm]	c [mm]	F [kN]	m [kg]
1OB	149,95	149,67	145,69	132,1	7,612
2OB	149,77	149,91	147,60	119,3	7,697
6OB	149,84	149,83	148,44	127,6	7,702

OB - 2,0/0,5/0,5					
	a [mm]	b [mm]	c [mm]	F [kN]	m [kg]
1OB	149,96	150,08	147,55	168,4	7,621
2OB	149,89	149,91	147,67	158,8	7,626
6OB	149,93	150,01	148,01	166,2	7,702

OB - 4,0/1,0/1,0					
	a [mm]	b [mm]	c [mm]	F [kN]	m [kg]
1OB	150,22	149,85	149,89	166,3	7,692
2OB	149,94	149,95	150,07	159,3	7,721
6OB	150,02	149,99	149,79	165,1	7,704

OB - 6,0/1,5/1,5					
	a [mm]	b [mm]	c [mm]	F [kN]	m [kg]
1OB	150,05	149,98	147,06	145,8	7,608
2OB	150,08	149,99	146,67	165,8	7,603
6OB	149,98	149,90	149,11	157,6	7,577

P2

Vstupní hodnoty: Statický modul pružnosti v tlaku, modul pružnosti a přetvárnosti v ohybu

Tab. 5-3 Statický modul pružnosti v tlaku

OB - R				
	b [mm]	a [mm]	l [mm]	Ec [GPa]
2 OB	100,34	100,64	400,11	32 600
3 OB	100,39	100,45	399,82	31 700
4 OB	100,14	99,00	400,00	31 000
OB - 2,0/0,5/0,5				
	b [mm]	a [mm]	l [mm]	Ec [GPa]
2 OB	99,61	97,25	399,44	35 400
3 OB	99,92	99,26	399,97	30 400
4 OB	100,03	97,13	400,00	34 200
OB - 4,0/1,0/1,0				
	b [mm]	a [mm]	l [mm]	Ec [GPa]
2 OB	100,45	100,83	401,00	32 300
3 OB	100,01	99,47	400,10	31 400
4 OB	100,30	100,07	400,59	39 600
OB - 6,0/1,5/1,5				
	b [mm]	a [mm]	l [mm]	Ec [GPa]
2 OB	100,57	100,78	400,44	31 400
3 OB	101,46	102,54	399,80	30 600
4 OB	100,72	101,90	400,29	33 300

Tab. 5-4 Modul pružnosti a přetvárnosti v ohybu

OB - R					
	b [mm]	a [mm]	l [mm]	E [MPa]	E ₀ [MPa]
2 OB	100,34	100,64	300,00	36611	34171
3 OB	100,39	100,45	300,00	35102	32177
4 OB	100,14	99,00	300,00	34964	32824

OB - 2,0/0,5/0,5					
	b [mm]	a [mm]	l [mm]	E [MPa]	E ₀ [MPa]
2 OB	99,61	97,25	300,00	40536	37267
3 OB	99,92	99,26	300,00	37557	31047
4 OB	100,03	97,13	300,00	41733	37307

OB - 4,0/1,0/1,0					
	b [mm]	a [mm]	l [mm]	E [MPa]	E ₀ [MPa]
2 OB	100,45	100,83	300,00	37279	33966
3 OB	100,01	99,47	300,00	34738	32065
4 OB	100,30	100,07	300,00	36248	32694

OB - 6,0/1,5/1,5					
	b [mm]	a [mm]	l [mm]	E [MPa]	E ₀ [MPa]
2 OB	100,57	100,78	300,00	37797	33145
3 OB	101,46	102,54	300,00	37146	34198
4 OB	100,72	101,90	300,00	39227	37047

P3

Vstupní hodnoty: Dynamický modul pružnosti v tlaku a tahu, dynamický modul pružnosti ve smyku

Tab. 5-5 Hodnoty naměřené na krychlích

OB - R					
	a [mm]	b [mm]	c [mm]	m [kg]	v _L [m/s]
1 OB	149,85	149,89	150,22	7,692	4 304
2 OB	149,95	150,07	149,94	7,721	4 256
3 OB	151,14	150,64	149,91	7,739	4 308
4 OB	149,88	148,66	149,87	7,676	4 315
OB - 2,0/0,5/0,5					
	a [mm]	b [mm]	c [mm]	m [kg]	v _L [m/s]
1 OB	150,08	147,55	149,96	7,621	4 305
2 OB	149,91	147,67	149,89	7,626	4 372
3 OB	150,06	146,48	149,91	7,625	4 337
4 OB	149,90	148,31	149,86	7,705	4 352
OB - 4,0/1,0/1,0					
	a [mm]	b [mm]	c [mm]	m [kg]	v _L [m/s]
1 OB	149,85	149,89	150,22	7,692	4 304
2 OB	149,95	150,07	149,94	7,721	4 256
3 OB	151,14	150,64	149,91	7,739	4 308
4 OB	149,88	148,66	149,87	7,676	4 315
OB - 6,0/1,5/1,5					
	a [mm]	b [mm]	c [mm]	m [kg]	v _L [m/s]
1 OB	149,98	147,06	150,05	7,608	4 375
2 OB	149,99	146,67	150,08	7,603	4 384
3 OB	149,99	147,01	149,86	7,519	4 319
4 OB	149,96	150,37	150,00	7,707	4 361

Tab. 5-6 Hodnoty naměřené na trámcích

OB - R								
	b [mm]	a [mm]	l [mm]	m [kg]	v_L [m/s]	f_L [Hz]	f_f [Hz]	f_t [Hz]
1 OB	100,07	96,80	399,73	9,013	4 314	5 130	2 210	3 000
2 OB	100,34	100,64	400,11	9,287	4 397	5 160	2 200	3 070
3 OB	100,39	100,45	399,82	9,247	4 407	5 180	2 180	3 060
4 OB	100,14	99,00	400,00	9,154	4 392	5 140	2 150	3 040
5 OB	99,99	96,13	399,89	8,929	4 403	5 140	2 120	3 040
6 OB	100,60	96,28	400,17	8,891	4 334	5 060	2 040	2 970
7 OB	99,98	99,01	399,71	9,089	4 361	5 120	2 130	3 020
8 OB	100,13	97,92	400,12	9,088	4 375	5 220	2 180	3 110
9 OB	100,62	96,67	400,28	8,960	4 343	5 120	2 120	3 050

OB - 2,0/0,5/0,5								
	b [mm]	a [mm]	l [mm]	m [kg]	v_L [m/s]	f_L [Hz]	f_f [Hz]	f_t [Hz]
1 OB	99,83	99,00	400,18	9,164	4 466	5 380	2 290	3 210
2 OB	99,61	97,25	399,44	9,033	4 406	5 280	2 220	3 130
3 OB	99,92	99,26	399,97	9,060	4 436	5 250	2 200	3 130
4 OB	100,03	97,13	400,00	9,182	4 433	5 290	2 230	3 150
5 OB	100,72	99,54	400,70	9,154	4 397	5 220	2 200	3 080
6 OB	100,21	95,69	400,04	8,885	4 398	5 240	2 250	3 120
7 OB	100,55	95,82	400,96	9,130	4 427	5 280	2 230	3 150
8 OB	101,99	99,53	399,69	9,198	4 394	5 230	2 200	3 090
9 OB	100,34	96,42	400,43	8,985	4 367	5 170	2 140	3 050

OB - 4,0/1,0/1,0								
	b [mm]	a [mm]	l [mm]	m [kg]	v_L [m/s]	f_L [Hz]	f_f [Hz]	f_t [Hz]
1 OB	100,20	99,72	400,41	9,298	4 317	4 880	2 210	3 010
2 OB	100,45	100,83	401,00	9,204	4 321	4 870	2 220	3 020
3 OB	100,01	99,47	400,10	9,142	4 293	4 860	2 200	3 010
4 OB	100,30	100,07	400,59	9,367	4 378	4 860	2 210	3 000
5 OB	100,22	100,48	400,54	9,105	4 243	4 920	2 170	3 020
6 OB	100,54	101,61	400,91	9,254	4 295	4 900	2 220	3 030
7 OB	99,91	98,90	401,20	9,072	4 328	4 880	2 180	3 000
8 OB	100,02	101,98	400,87	9,278	4 327	4 890	2 220	3 020
9 OB	100,21	100,00	400,00	9,220	4 327	4 860	2 200	3 000

OB - 6,0/1,5/1,5								
	b [mm]	a [mm]	l [mm]	m [kg]	v_L [m/s]	f_L [Hz]	f_f [Hz]	f_t [Hz]
1 OB	100,93	100,89	399,76	9,161	4 283	4 870	2 200	2 960
2 OB	100,57	100,78	400,44	9,055	4 292	4 870	2 190	2 980
3 OB	101,46	102,54	399,80	9,038	4 270	4 890	2 160	2 990
4 OB	100,72	101,90	400,29	9,132	4 292	4 850	2 170	2 970
5 OB	100,42	100,08	400,37	9,137	4 288	4 860	2 170	2 970
6 OB	100,42	100,50	400,18	9,030	4 290	4 890	2 160	2 980
7 OB	100,27	101,28	401,06	9,123	4 285	4 860	2 200	2 980
8 OB	100,51	103,25	400,61	9,302	4 350	4 860	2 230	2 970
9 OB	100,02	101,90	401,10	9,253	4 347	4 900	2 200	2 980

P4

Vstupní hodnoty: Lomové parametry, akustická emise

Tab. 5-7 Lomové parametry

OB - R						
	l [mm]	b [mm]	a [mm]	hloubka zářezu a ₀ [mm]	šířka zářezu [mm]	m [kg]
5OB	399,89	99,99	96,13	33,42	2,15	8,929
6OB	400,17	100,60	96,28	32,98	2,21	8,891
7OB	399,71	99,98	99,01	33,22	2,05	9,089
OB - 2,0/0,5/0,5						
	l [mm]	b [mm]	a [mm]	hloubka zářezu a ₀ [mm]	šířka zářezu [mm]	m [kg]
5OB	400,70	100,72	99,54	33,42	2,10	9,154
6OB	400,04	100,21	95,69	32,51	2,12	8,885
7OB	400,96	100,55	95,82	33,24	2,09	9,130
OB - 4,0/1,0/1,0						
	l [mm]	b [mm]	a [mm]	hloubka zářezu a ₀ [mm]	šířka zářezu [mm]	m [kg]
5OB	400,54	100,22	100,48	33,37	2,13	9,105
6OB	400,91	100,54	101,61	33,15	2,18	9,254
7OB	401,20	99,91	98,90	33,47	2,06	9,072
OB - 6,0/1,5/1,5						
	l [mm]	b [mm]	a [mm]	hloubka zářezu a ₀ [mm]	šířka zářezu [mm]	m [kg]
5OB	400,37	100,42	100,08	31,01	2,04	9,137
6OB	400,18	100,42	100,50	32,36	1,92	9,030
7OB	401,06	100,27	101,28	32,02	1,87	9,123